La Rivista di Gran Turismo

a

Beyond the Apex

GT ACADEMY

2008-2013

GT ACADEMY
2008-2013

Gran Turismo: risveglia, ispira
e sviluppa potenziali piloti di talento.

L'abilità e la determinazione di pochi eletti vengono messe a dura prova

GT ACADEMY
2008-2013

su una delle piste più famose nella storia degli sport motoristici.

Scegli il livello di potenza oppure il tipo di trazione.
Prendi parte a 1.000 prove a tempo.
Porta l'esperienza nella realtà con il miglior simulatore di guida.

E poi vai oltre.
GT Academy ha visto la luce nel 2008. La sua missione è aiutare i migliori piloti di Gran Turismo a realizzare il loro sogno: diventare veri piloti automobilistici.

Negli anni seguenti, il progetto si è sviluppato in modo incredibile.
Nel 2012, ben 1,4 milioni di giocatori di Europa, America, Russia, Sudafrica e Medio Oriente hanno preso parte alle fasi di qualifica.

Tutti possono inseguire il sogno
di diventare un pilota professionista.
E forse un giorno, sul gradino più alto del podio di un famoso autodromo,
circondato da una folla sconfinata di appassionati,
potresti esserci tu.

La vera natura del carattere di un individuo
viene portata alla luce.

GT ACADEMY
2008-2013

GT ACADEMY
2008-2013

Questo punto indica la linea di partenza, da dove ha inizio la dura strada per realizzare un sogno.

Beyond the Apex

Sommario

Ingegneria automobilistica

1

La Rivista di Gran Turismo
Beyond the Apex

Prefa

Esistono molte pubblicazioni sull'ingegneria automobilistica, dai manuali di livello professionale alle riviste dedicate al grande pubblico. Esiste, però, una notevole differenza fra i tecnici professionisti del settore automobilistico e i semplici appassionati, quando si tratta di comprendere i meccanismi alla base del funzionamento di un'auto.

L'intenzione di quest'opera è colmare parzialmente questa lacuna, condividendo alcune delle nozioni basilari note ai professionisti dell'automobilismo. Inoltre, esporremo alcune nozioni che dovrebbero risultare interessanti anche a persone dotate di preparazione di carattere tecnico. Ci auguriamo che la lettura di queste sezioni consenta di incrementare la propria conoscenza dell'ingegneria automobilistica, consentendo così di apprezzare ancor più le auto più potenti del mondo.

Il primo capitolo descriverà la meccanica di base e introdurrà i concetti di forza, momento meccanico ed energia, per proseguire con una discussione sulla teoria del moto oscillatorio. Forza, momento meccanico ed energia sono le grandezze fisiche fondamentali dell'ingegneria e la teoria delle oscillazioni, spiegata nel secondo capitolo, sta alla base della cinetica del veicolo e della messa a punto delle sospensioni.

Il secondo capitolo descrive la cinetica del veicolo e il metodo di messa a punto delle sospensioni. Consentirà di capire come i professionisti analizzano il concetto di movimento delle sospensioni e come questo influenza il veicolo. In particolare, saranno esposte le basi delle prove di sterzata dei veicoli e si parlerà di come le sospensioni si possano analizzare con un sistema a sette attuatori.

zione

Il terzo capitolo introdurrà le basi della meccanica statistica e della termodinamica, utilizzate nella progettazione di un motore automobilistico. Quale tipo di propulsore può raggiungere il rendimento teorico? Perché in un motore reale si verifica una dissipazione di energia, che impedisce di raggiungere tale rendimento teorico? Esploreremo i fenomeni fisici che stanno alla base delle dissipazioni di energia.

Il quarto capitolo tratterà dell'aerodinamica. Spesso il teorema di Bernoulli, che descrive la relazione fra pressione e velocità, viene utilizzato per descrivere la deportanza di un'auto da corsa e la portanza di un aereo. Per quanto la cosa sia poco nota al di fuori dell'ambiente dei professionisti della fluidodinamica, detto teorema è solamente l'inizio di quel complicato mondo che è l'aerodinamica: noi andremo un passo oltre, esplorando il concetto di aerodinamica teorica.

Il quinto capitolo affronterà la fluidodinamica computazionale (da qui in avanti, CFD). La CFD è un elemento imprescindibile dello sviluppo automobilistico ed è nota agli appassionati di automobili, in quanto è uno degli strumenti più utilizzati durante lo sviluppo di vetture da corsa. In realtà, però, in pochi sanno come si procede realmente alla progettazione di una vettura usando la CFD: per questo intendiamo esporre, seppur brevemente, i concetti della teoria della CFD.

Le teorie ingegneristiche presentate in queste pagine rappresentano conoscenze di base per gli ingegneri automobilistici, ma possono risultare relativamente difficili da comprendere per il lettore neofita. Riuscire ad acquisire tutte queste nozioni potrebbe essere complicato: in questo caso, consigliamo di leggere soltanto ciò che ti interessa. Speriamo che queste nozioni permettano quanto meno di aprire uno spiraglio su un mondo per lo più nascosto al grande pubblico, solitamente riservato ai pochi che possono definirsi ingegneri professionisti.

1-1 I concetti di forza e momento meccanico

▶ Scopriamo quali sono le loro definizioni e differenze

Quando un'auto è in movimento, su di essa agiscono diverse forze, fra le quali il momento meccanico. Comprendere i loro effetti è un primo passo verso la comprensione dell'auto.

Definizione di forza

Le gomme, le sospensioni e il motore generano una forza, quando il veicolo si muove. Queste forze si generano in diversi modi e sembrano produrre diversi tipi di potenza. In realtà, non esistono differenze fra di loro e tutte possono essere calcolate in modo semplice usando la stessa formula, vale a dire l'equazione del moto: F = ma (forza = massa x accelerazione).

L'equazione del moto mostra che l'accelerazione dei corpi è generata dall'applicazione di una o più forze, il che significa che è la forza che modifica velocità e direzione di movimento di un oggetto. Se velocità o direzione di una massa cambiano, è sempre a causa della presenza di una forza di qualche tipo.

Per esempio, l'attrito generato fra la superficie stradale e le gomme cambia velocità e direzione di movimento dell'auto (che è una massa), mentre la forza di smorzamento degli ammortizzatori ha l'effetto di ridurre la velocità di oscillazione di vettura e pneumatici.

Figura 1-1-1 Anche se le varie forze che agiscono su una vettura possono apparire di natura diversa, dal punto di vista fisico vengono tutte trattate allo stesso modo

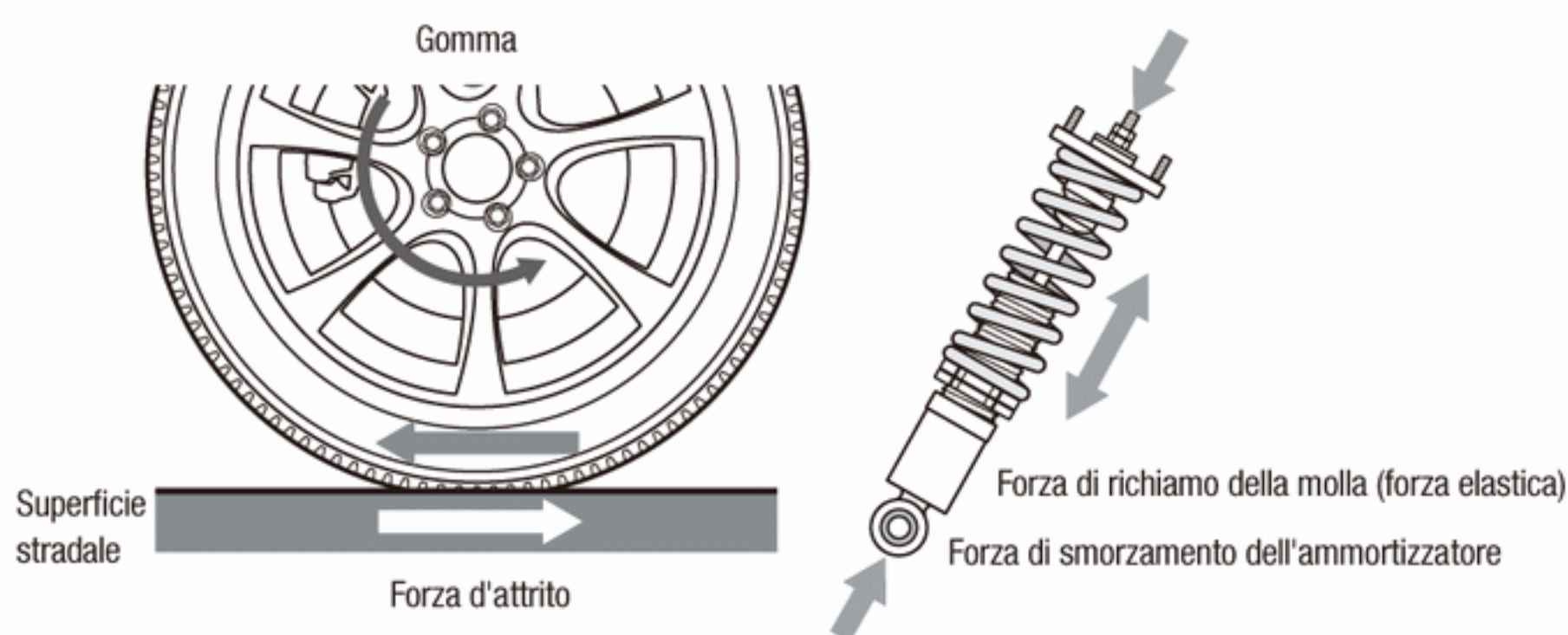
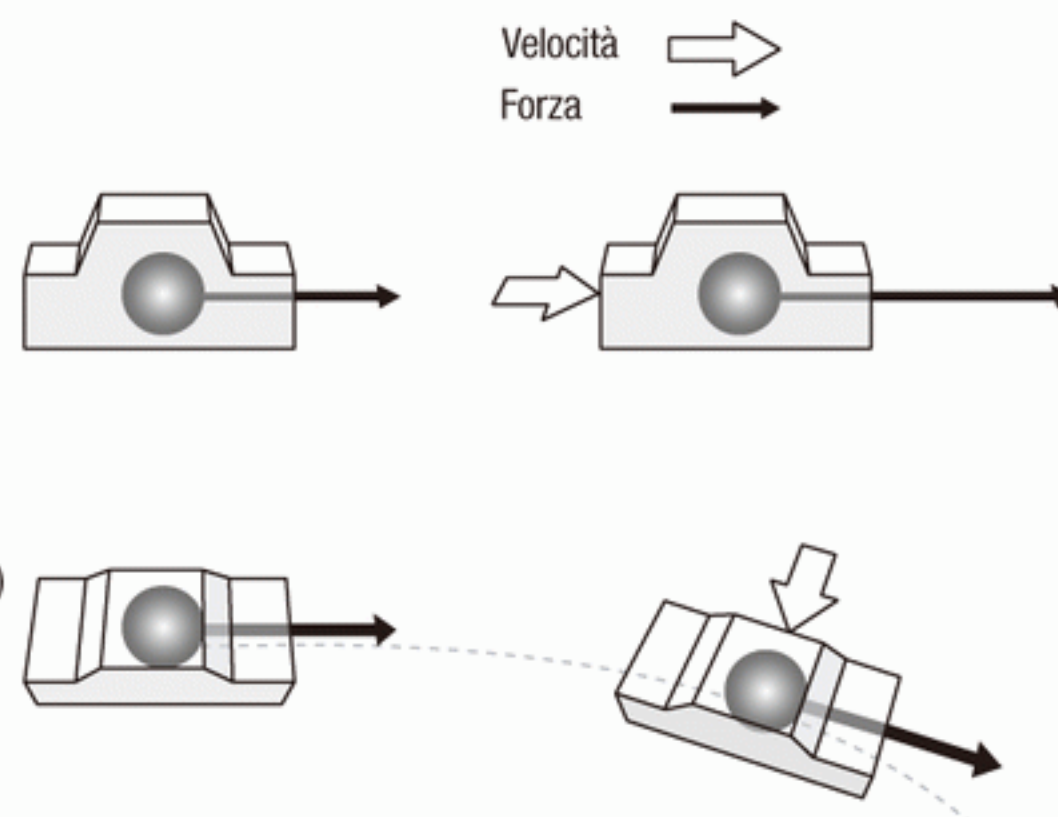



Figura 1-1-2 La forza è quella grandezza fisica che modifica velocità e direzione di movimento di un oggetto

Applicando una forza si modifica la velocità e la direzione di un oggetto.

Le diverse forze generate da una vettura possono essere tutte calcolate tramite questa equazione:

F = ma (forza = massa x accelerazione)

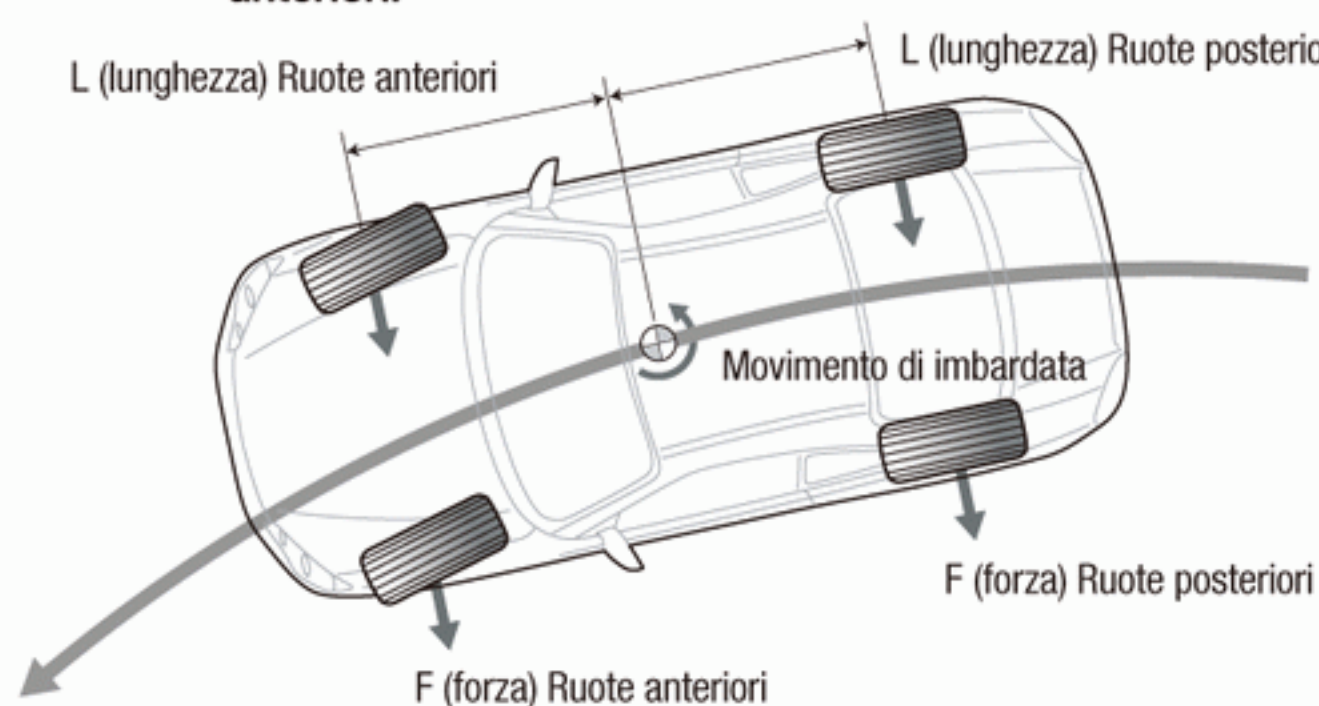
La forza è la grandezza fisica che influenza la velocità di una massa.

Definizione di momento meccanico

Quando ruoti il volante, l'auto cambia direzione perché le gomme generano una forza in direzione perpendicolare alla direzione di movimento. Il movimento rotatorio causato da questa forza viene definito come imbardata. In modo simile, il momento meccanico viene definito come quella forza che causa il movimento rotatorio di un oggetto. L'intensità del momento meccanico dipende dall'intensità della forza applicata, moltiplicata per la distanza dall'asse di rotazione. Il tutto può essere rappresentato matematicamente come M = L x F (momento meccanico = distanza dall'asse di rotazione x forza).

Consideriamo il momento meccanico che agisce sulla rotazione di un'auto. Se l'asse di rotazione si trova nel baricentro del veicolo, la quantità di momento meccanico generata dalle ruote anteriori viene determinata dalla [distanza delle ruote anteriori dal baricentro] x [forza laterale generata dalle ruote anteriori]. Ovviamente, durante la curva, le ruote posteriori generano momento meccanico in base alla [distanza delle ruote posteriori dal baricentro] x [forza laterale generata dalle ruote posteriori]. Questo provoca resistenza nella direzione opposta sulle ruote anteriori, andando così a influenzare il loro momento meccanico.

Per esempio, durante la percorrenza di una curva, quando ruoti il volante, il momento meccanico sulle ruote anteriori risulta maggiore di quello sulle ruote posteriori, il che dà inizio alla rotazione del veicolo. Il momento meccanico generato dalle ruote anteriori e da quelle posteriori è uguale vicino al punto di corda della curva: una volta superato quest'ultimo, il rilascio dello sterzo rende il momento meccanico sulle ruote posteriori più grande di quello sulle ruote anteriori, il che fa arrestare la rotazione.

Figura 1-1-3 **Il rapporto fra il momento meccanico applicato al veicolo dalle ruote anteriori e posteriori e il movimento rotatorio. Un'auto inizia a curvare quando il momento meccanico delle ruote anteriori è superiore a quello delle ruote anteriori.**

L ruote anteriori x F ruote anteriori > L ruote posteriori x F ruote posteriori: l'angolo di imbardata del veicolo aumenta (la vettura accentua la curva).

L ruote anteriori x F ruote anteriori > L ruote posteriori x F ruote posteriori: l'angolo di imbardata del veicolo aumenta (la vettura accentua la curva).

Il momento meccanico è la forza che innesca il movimento rotatorio di un oggetto.

M = L x F (momento meccanico = distanza dall'asse di rotazione x forza).

Figura 1-1-4

SUGGERIMENTI La figura 1-1-4 mostra la forza generata dalle ruote anteriori e posteriori di una Nissan GT-R NISMO GT3 (a sinistra) e una Nissan Delta Wing (a destra). Assumiamo che l'asse di rotazione del veicolo si trovi nel suo baricentro. Ora nota che la distanza dalle ruote anteriori e posteriori per ogni asse di rotazione (baricentro) è diversa. Possiamo vedere che, per bilanciare il momento meccanico generato alle ruote anteriori e posteriori, per ogni veicolo è necessario applicare forze diverse sulle ruote anteriori e posteriori. Il baricentro della Delta Wing è molto arretrato, quindi l'aderenza necessaria sulle gomme anteriori è molto diversa da quella sulle ruote posteriori. Nella realtà, sull'anteriore della Delta Wing viene usata una gomma speciale, di soli 10 cm di larghezza. Il baricentro della GT-R NISMO GT3 è invece vicino al centro della carrozzeria, per cui gomme anteriori e posteriori richiedono una forza di intensità grossomodo equivalente.

1-2 Il concetto di energia

▶ Comprendere il concetto della conservazione dell'energia

La legge di conservazione dell'energia

Le reazioni che si verificano su una vettura possono essere di tipo cinetico, termico, elettrico, magnetico e chimico. Per esempio, quando il carburante prende fuoco nel cilindro di un motore, la temperatura aumenta e il pistone si muove, con il risultato di una reazione chimica, termica e cinetica.

Oltre alla forza, questi diversi tipi di fenomeni fisici generano un elemento comune, cioè l'energia. L'energia può mutare la propria forma anche fra diversi fenomeni fisici: la sua quantità totale, però, non cambia fra prima e dopo questa conversione, restando costante. Questa è la legge di conservazione dell'energia.

Figura 1-2-1 **Il concetto di energia**

Fenomeni fisici in una vettura

- Reazione cinetica
- Reazione termica
- Reazione elettrica
- Reazione magnetica
- Reazione chimica

→ L'energia è un comune prodotto dei fenomeni fisici

La frenata è un atto che trasforma energia cinetica in energia termica.

Conservazione nel cilindro del motore

Se consideriamo l'energia generata dal movimento di un cilindro del motore, ci accorgiamo che l'energia chimica del combustibile viene convertita in energia termica e cinetica che fa muovere i pistoni. In altre parole, il motore a combustibile è un dispositivo che converte energia chimica in energia cinetica, più facilmente utilizzabile per lo scopo prefissato. Nel momento della conversione, la legge di conservazione dell'energia garantisce che la quantità di energia chimica convertita è uguale alla somma delle quantità di energia cinetica e termica prodotte. La capacità di un motore di convertire la maggior quantità possibile di energia chimica in energia cinetica utilizzabile è quella che definisce il rendimento di un propulsore.

Figura 1-2-2 Il concetto di conversione dell'energia nel cilindro di un motore

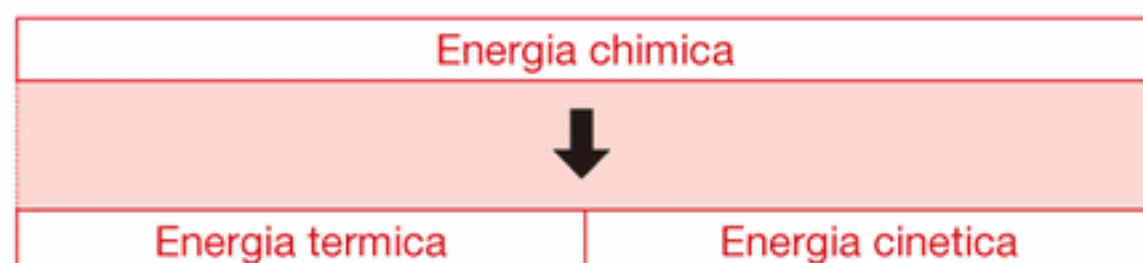
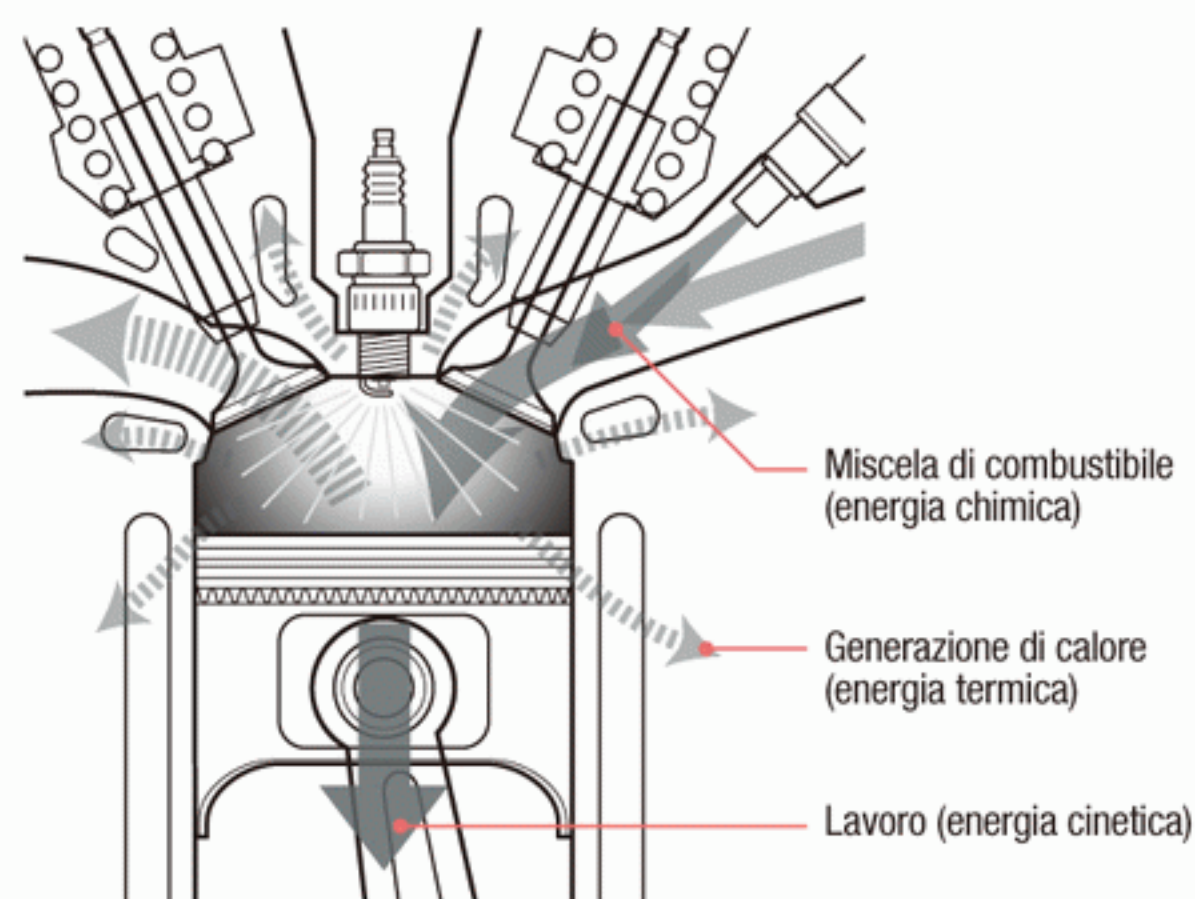
Energia chimica	
⬇	
Energia termica	Energia cinetica

La conversione da una forma all'altra di energia non ne modifica la quantità totale. Questa si definisce legge di conservazione dell'energia.

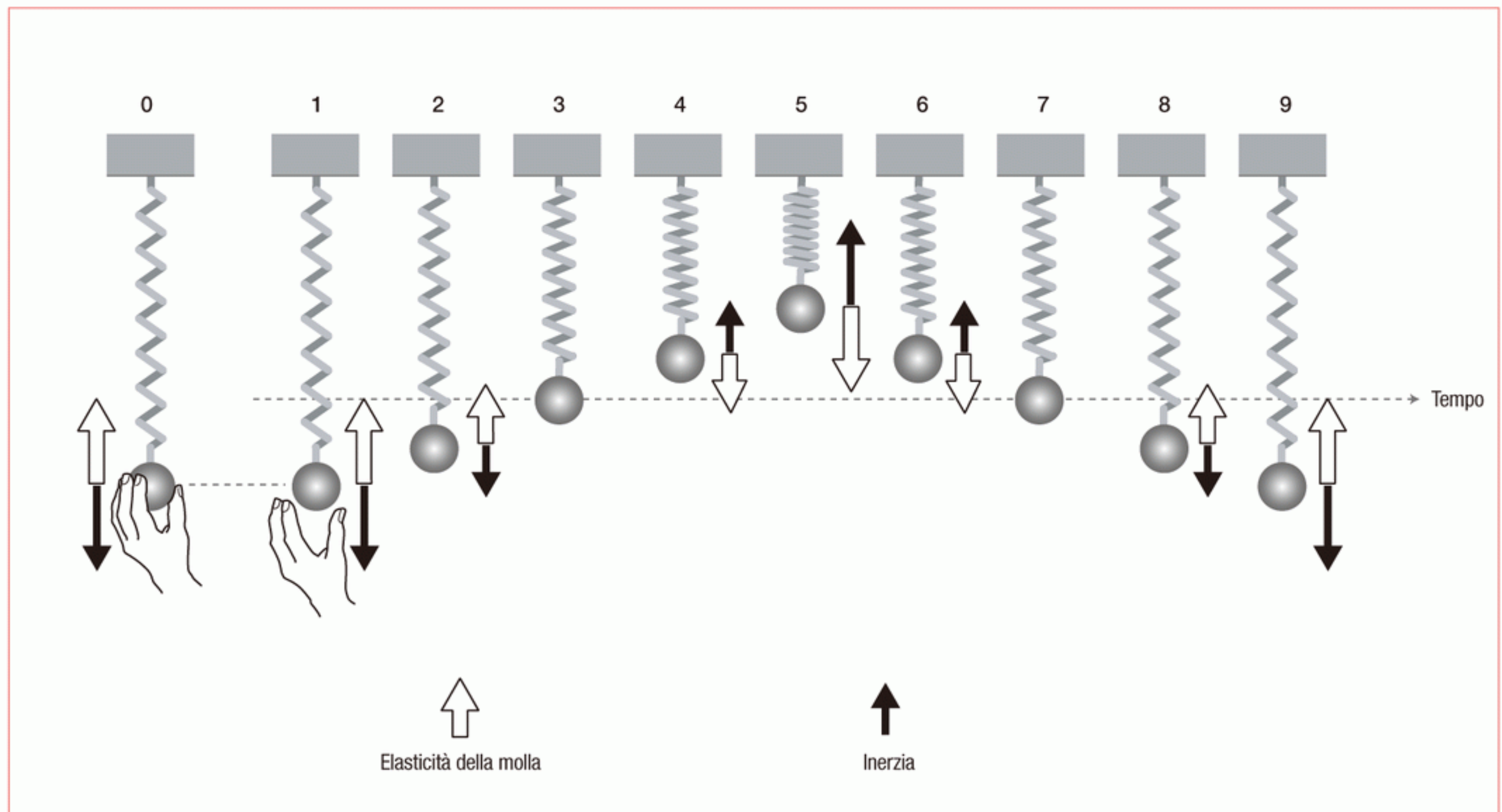
Figura 1-2-3

Il meccanismo delle oscillazioni

▶ L'oscillazione è collegata alla massa e all'elasticità di un oggetto

L'oscillazione avviene all'interno dei motori, delle sospensioni, della carrozzeria, eccetera. Nella seconda parte spiegheremo nei dettagli come anche il movimento del veicolo fa parte del fenomeno oscillatorio. Per ora chiediamoci: che cos'è il meccanismo delle oscillazioni? Prima di addentrarci in una discussione sul movimento del veicolo, è necessario chiarire il concetto stesso di oscillazione.

Oscillazione dal punto di vista della forza

Un modo facile per afferrare questo concetto è immaginare una singola molla con un peso attaccato. Questo è un sistema oscillante, (figura 1-3-1). Quando tiri il peso con una mano, allungando la molla, viene generata una forza elastica che contrasta la forza applicata dalla tua mano (n° 1-2). Al rilascio del peso, la molla torna alla sua lunghezza originaria, trascinando il peso con sé grazie alla propria elasticità (n° 3). La molla torna alla lunghezza iniziale ma, anche quando la forza elastica si esaurisce, il peso tende a continuare a muoversi per via dell'inerzia (n° 4). La molla raggiunge la compressione massima e, come risultato, il movimento del peso rallenta fino al punto in cui questo si arresta temporaneamente (n° 5), prima che la forza del peso causi un nuovo allungamento (n° 6). La molla compressa genera una forza elastica che tende a farla ritornare alla propria forma iniziale (n° 7). Alla fine la molla torna in effetti in questo stato, ma a causa dell'inerzia del peso tende a muoversi nuovamente (n° 8). Il ciclo da 1 a 8 prosegue e va a smorzarsi lentamente, finché la molla non torna definitivamente nella posizione originale. Questa è l'oscillazione dal punto di vista della forza. Nel fenomeno oscillatorio, inerzia ed elasticità di un oggetto diventano entrambi causa ed effetto.

Figura 1-3-1 **Considerata dal punto di vista della forza, la forza inerziale del peso corrisponde sempre all'elasticità della molla. Nota come la lunghezza delle frecce nella direzione verticale della molla sia uguale in ogni processo**

Oscillazione dal punto di vista dell'energia

Il moto appena descritto può essere affrontato anche dal punto di vista della conservazione dell'energia. Se consideriamo l'oscillazione dal punto di vista energetico, si può dire che si tratta di uno scambio fra l'energia cinetica del peso e l'energia elastica generata dall'espansione e contrazione della molla (energia elastica). L'energia elastica della molla è al massimo quando quest'ultima è al culmine del movimento (pienamente estesa o pienamente compressa), come mostrato nella figura 1-3-1, punti 1, 5 e 9.

La velocità massima del peso, e di conseguenza la sua energia cinetica massima, si possono vedere alle posizioni 3 e 7, nei punti dove la molla è tornata temporaneamente alla propria lunghezza originale.

Figura 1-3-2 Dal punto di vista dell'energia, l'oscillazione è uno scambio fra l'energia cinetica del peso e l'energia elastica della molla

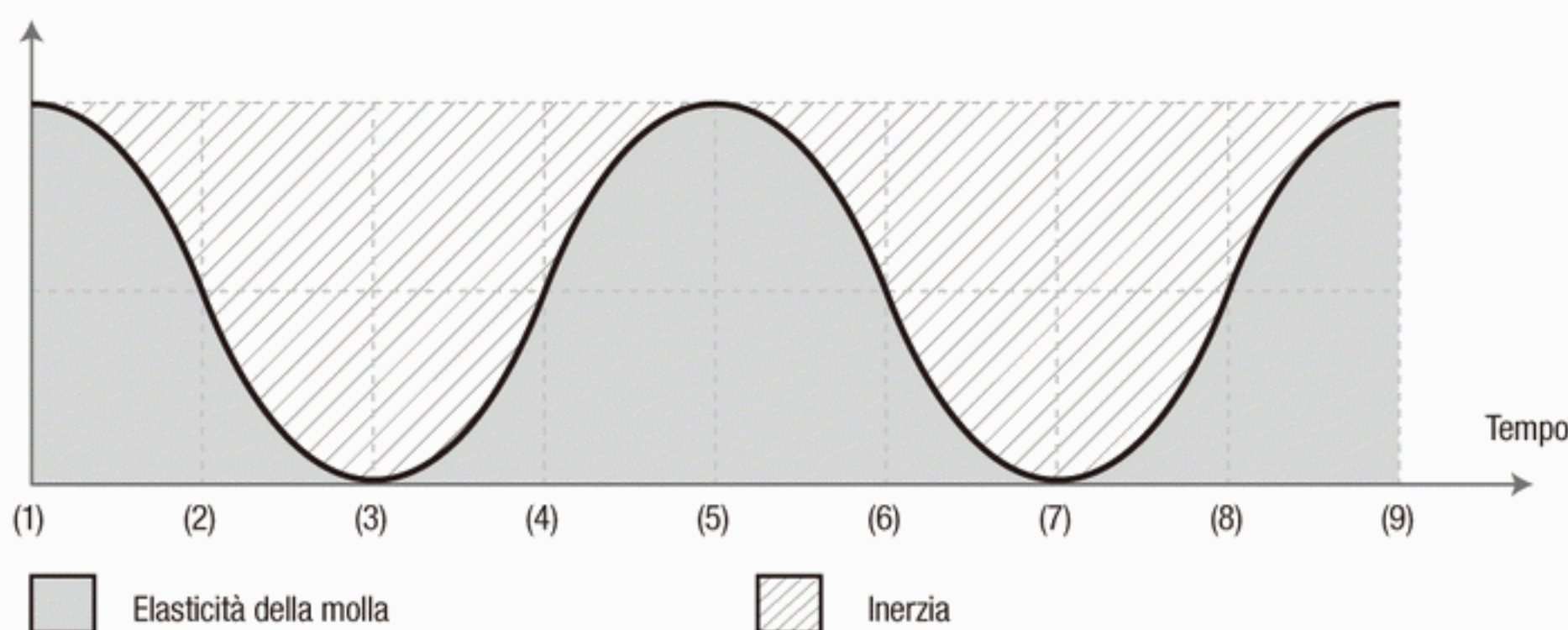
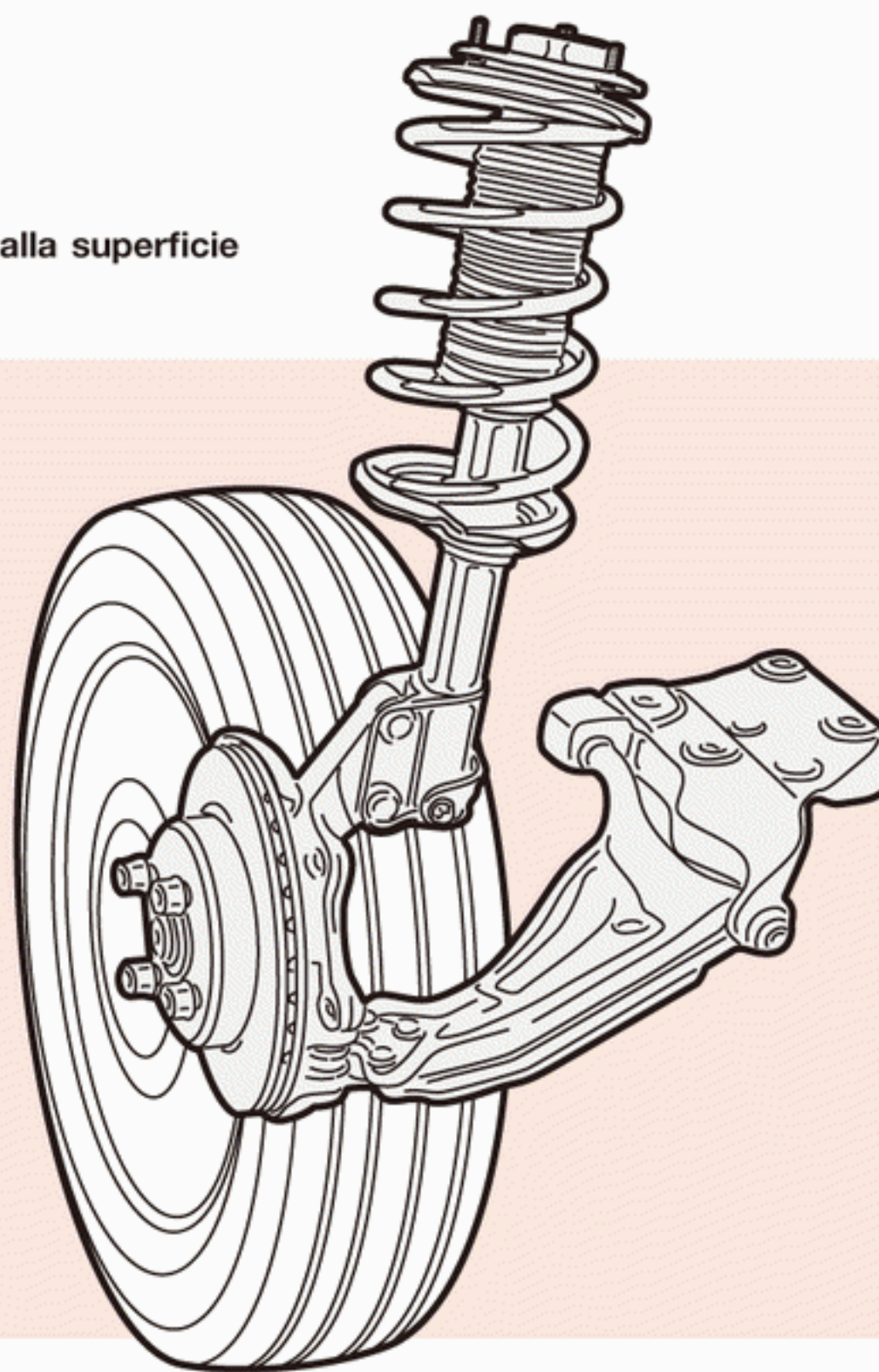



Figura 1-3-3 L'oscillazione più ovvia collegata a una vettura è quella trasmessa dalla superficie stradale alle sospensioni

1-4 Il fenomeno di risonanza

▶ La risonanza è uno stato nel quale si annulla la resistenza a una sollecitazione esterna

Il fenomeno noto come risonanza complica le considerazioni in merito a soggetti quali le vibrazioni nelle sospensioni e nel motore. La risonanza va evitata nella massima misura possibile, anche quando viene generata in condizioni di necessità. Per capire perché, vediamo di spiegare esattamente di cosa si tratta.

Figura 1-4-1 Quando lasciamo oscillare liberamente il sistema, esso oscillerà alla sua frequenza naturale, senza oscillare ad altre frequenze

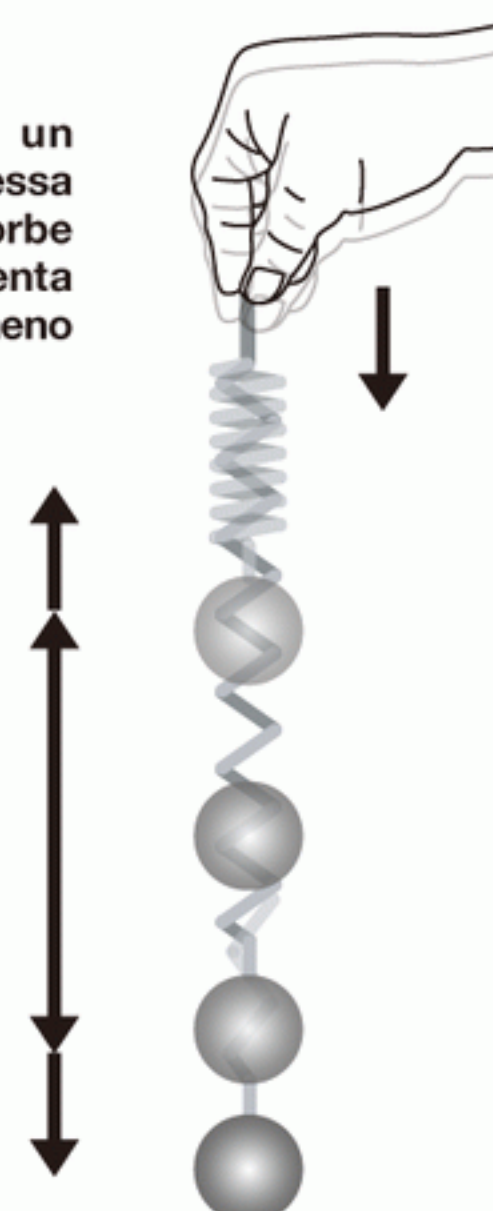
Oscillazione libera e frequenza naturale

Consideriamo un sistema oscillatorio composto da una molla e un peso. Dopo aver allungato il sistema una volta, lo si lascia oscillare liberamente, generando quello che viene definito moto oscillatorio libero. In poco tempo, il peso e la molla prendono a oscillare a una frequenza costante. La frequenza di oscillazione non dipende dalla forza che si è esercitata sul sistema per estenderlo. Il numero di oscillazioni al secondo è legato naturalmente all'elasticità della molla e alla massa: da questo la definizione di frequenza naturale. Questa frequenza naturale è basata sull'oscillazione del sistema stesso: quando quest'ultimo oscilla alla frequenza naturale, l'elasticità della molla e l'inerzia del peso risultano sempre uguali, portando così a ripetuti scambi di energia.

Oscillazione forzata e risonanza

Ora estendiamo e comprimiamo forzatamente la molla e il peso, utilizzando una mano: si ottiene così quello che si definisce moto oscillatorio forzato. Se, così facendo, si impedisce al sistema di oscillare alla propria frequenza naturale, si avvertirà una certa resistenza. Quando un sistema oscilla alla sua frequenza naturale, tutte le altre frequenze vengono considerate innaturali. A prescindere dal fatto che l'oscillazione sia applicata esternamente o meno, un sistema oscillatorio tenterà sempre di oscillare alla sua frequenza naturale e qualsiasi altro tipo di oscillazione genererà una resistenza.

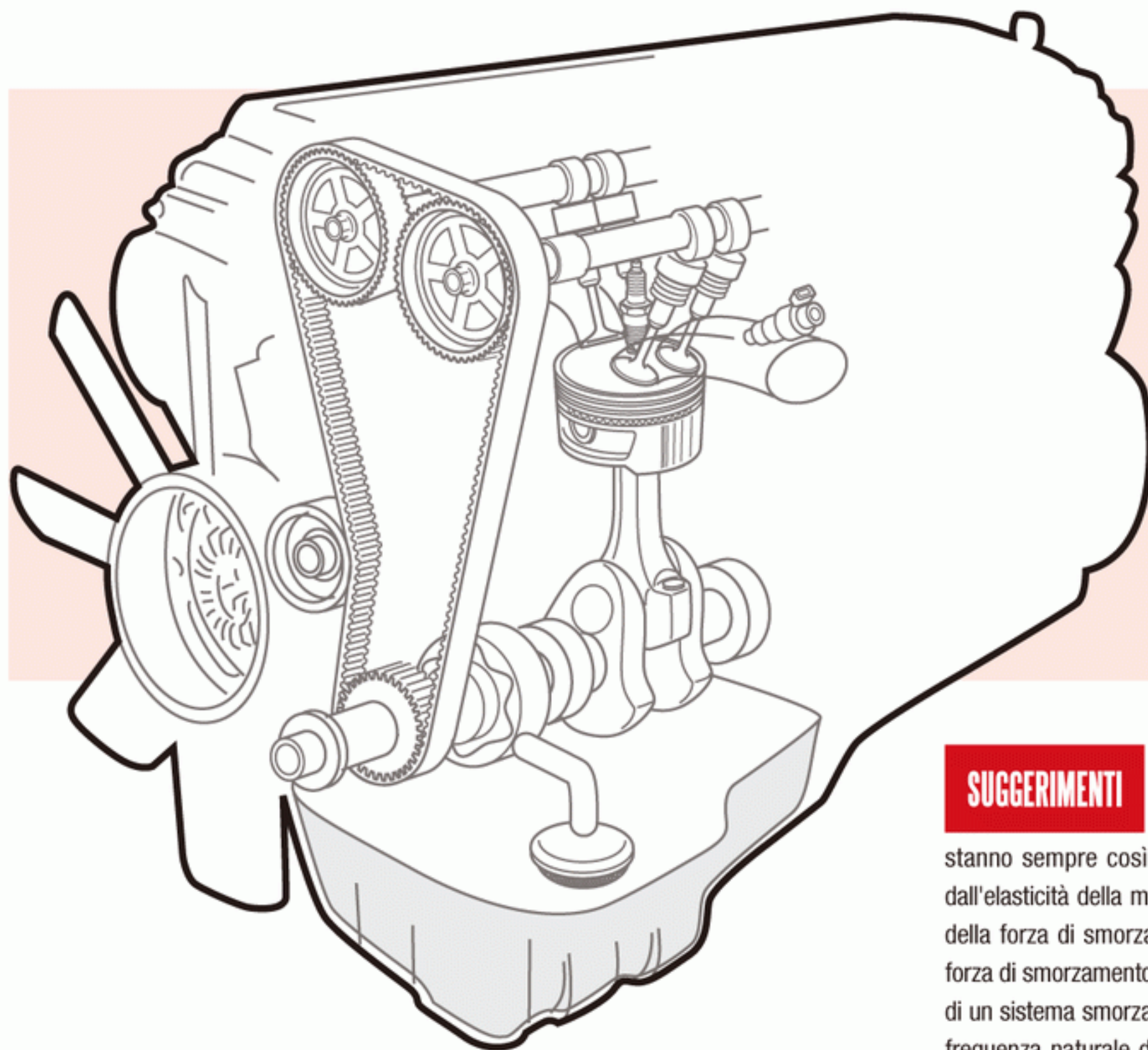
Figura 1-4-2 Quando un sistema viene forzato a oscillare ad una frequenza diversa da quella naturale, esso per reazione tenderà sempre verso la condizione di frequenza naturale. Questo genera la resistenza

Figura 1-4-3 Quando alla frequenza naturale di un sistema viene aggiunta un'oscillazione, essa non genera resistenza. Il sistema assorbe l'energia cinetica della mano e incrementa l'ampiezza dell'oscillazione con un fenomeno noto come risonanza

Oscillazione forzata e risonanza (continua)

Che cosa succede quando si sollecita il sistema estendendolo e comprimendolo a una frequenza pari alla sua frequenza naturale? Non si avvertirà alcuna resistenza, in quanto la sollecitazione avviene appunto alla stessa frequenza naturale del sistema. In questo caso noteresti come l'intensità delle oscillazioni aumenta per compensare la sollecitazione aggiunta: questo a causa del fatto che il sistema assorbe energia dalla sollecitazione esterna, invece di opporvi resistenza. L'ampiezza di oscillazione del sistema continuerà pertanto ad aumentare fintanto che la sollecitazione alla frequenza naturale rimane attiva.

Come spiegato in precedenza, il fenomeno che vede aumentare l'ampiezza delle oscillazioni a causa della sollecitazione esterna (anch'essa di carattere oscillatorio) aggiunta al moto di oscillazione naturale del sistema viene definito "risonanza". La frequenza che lo causa viene pertanto definita "frequenza di risonanza".

Per esempio, la risonanza nelle sospensioni porta a un deterioramento del comfort di guida e della resistenza alle asperità del terreno. Inoltre, se il motore stesso genera risonanza, può arrivare a subire dei danni. Per questi motivi è necessario evitare il più possibile la risonanza. Uno dei metodi per impedirla è l'utilizzo di un sistema di ammortizzatori, che assorbe l'energia delle vibrazioni e la converte in energia termica, da disperdere esternamente. Ciò significa che un sistema di ammortizzamento efficace può impedire rotture nei meccanismi.

Figura 1-4-4 Il motore può essere considerato un sistema oscillatorio nel quale le oscillazioni sono causate dalla combustione continua. Se un motore entra in risonanza può subire gravi danni al blocco motore o alla testata

SUGGERIMENTI Nelle descrizioni elencate finora, frequenza naturale e frequenza di risonanza sembrano essere identiche, ma in realtà le cose non stanno sempre così. La frequenza naturale è determinata unicamente dalla massa e dall'elasticità della molla, mentre quella di risonanza si determina aggiungendo l'elemento della forza di smorzamento alla frequenza naturale. Se nel sistema non è presente una forza di smorzamento, frequenza naturale e frequenza di risonanza sono uguali. In presenza di un sistema smorzato, però, la frequenza di risonanza viene ridotta e risulta diversa dalla frequenza naturale del sistema. Tieni presente che la frequenza di risonanza (frequenza naturale) per un sistema non smorzato è a volte chiamata anche "frequenza naturale non smorzata" e che la frequenza di risonanza di un sistema con smorzamento si può definire "frequenza naturale smorzata".

1-5 Effetto della forza di smorzamento

▶ Lo stato di oscillazione varia con la forza di smorzamento

Finora abbiamo considerato il caso delle oscillazioni di un sistema composto da una molla e un peso. Abbiamo visto che la risonanza rappresenta un problema quando il sistema oscillatorio viene forzato da una forza esterna a oscillare alla sua frequenza naturale (frequenza di risonanza). Esistono alcuni metodi per evitare i problemi causati dalla risonanza: il più comune è quello di installare un ammortizzatore. Un ammortizzatore è un dispositivo che dissipa le oscillazioni convertendo l'energia cinetica in energia termica. Lo stato di oscillazione viene però influenzato notevolmente dall'intensità della forza di smorzamento esercitata dall'ammortizzatore. Vale la pena pertanto di esaminare l'effetto delle differenze di forza di smorzamento nell'ambito dei moti oscillatori.

Oscillazione libera con rapporto di smorzamento diverso

L'oscillazione descritta finora è il risultato della forza elastica della molla e della forza peso della massa. Inserendo un ammortizzatore nel sistema, però, le oscillazioni vengono smorzate e il movimento si arresta rapidamente. Nel corso del processo, l'intensità della forza di smorzamento influenza lo smorzamento delle oscillazioni. Qui il rapporto di smorzamento è un indicatore dell'intensità della forza di smorzamento che agisce contro l'effetto della massa e della forza elastica della molla.

Se il rapporto di smorzamento è superiore a 1, il movimento del sistema tende verso uno stato di carattere non oscillatorio, dato che l'effetto della forza di smorzamento domina su quello delle forze di molla e massa. Questo stato viene definito sovra-smorzamento (sovra-attenuazione). Quando si verifica,

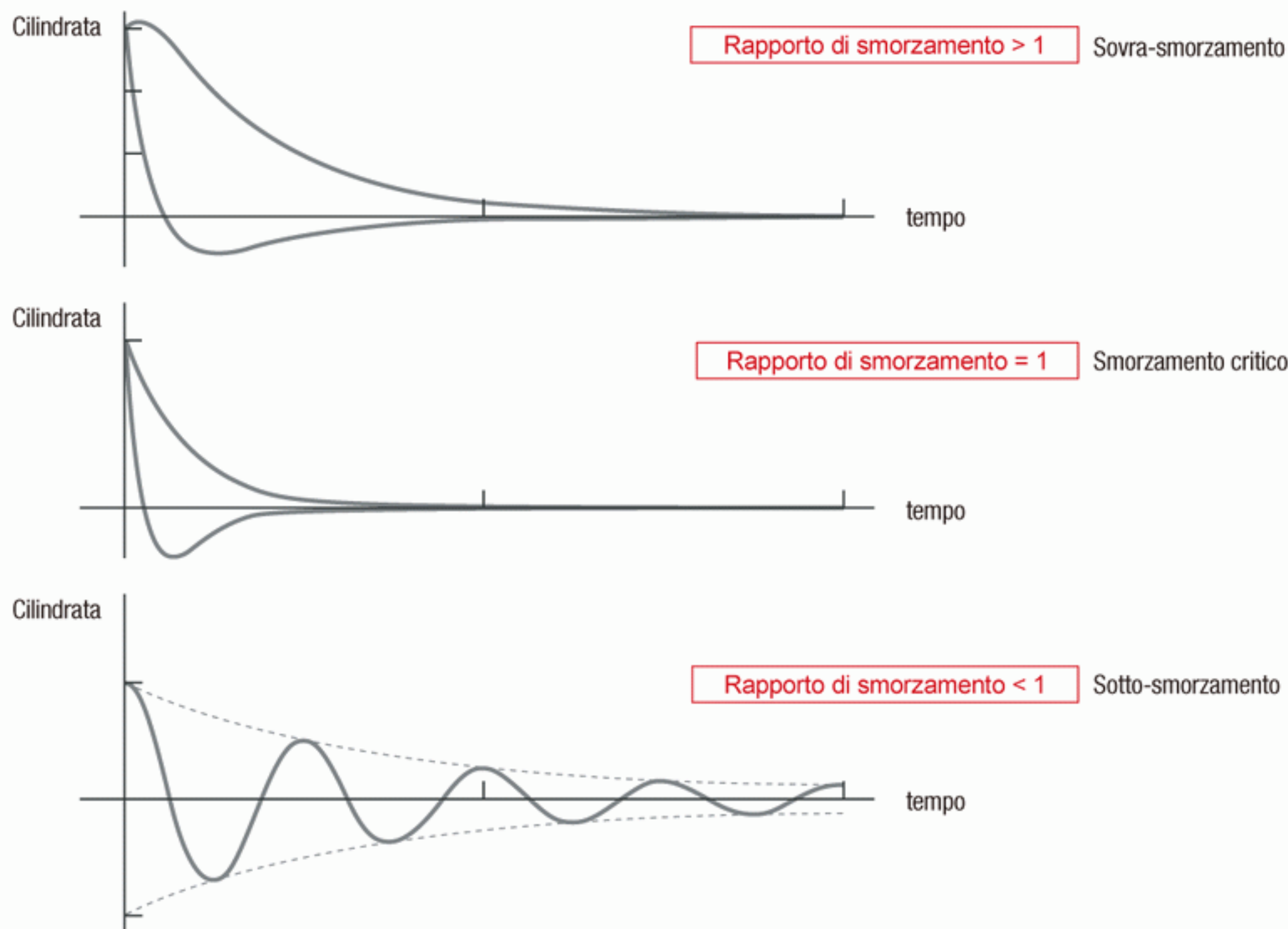
Figura 1-5-1 Esempio di oscillazione del sistema di ammortizzamento

l'ampiezza delle oscillazioni cala nel tempo e si genera un moto aperiodico, in cui l'ampiezza tende asintoticamente a 0. Se il rapporto di smorzamento è inferiore a 1, se cioè le forze di molla e massa sono più intense di quella di smorzamento, il moto continua a essere oscillatorio ma l'ampiezza di oscillazione diminuisce nel tempo. Questo stato si definisce sotto-smorzamento (mancanza di attenuazione). Per inciso, quando il rapporto di smorzamento è 0, la forza di smorzamento non agisce e ci si trova in uno stato simile a quello di un ammortizzatore guasto, quindi con oscillazioni non smorzate. Inoltre, se il rapporto di smorzamento è 1, si verifica uno stato critico particolare, che delimita la transizione tra moto smorzato con e senza oscillazioni, definito smorzamento critico.

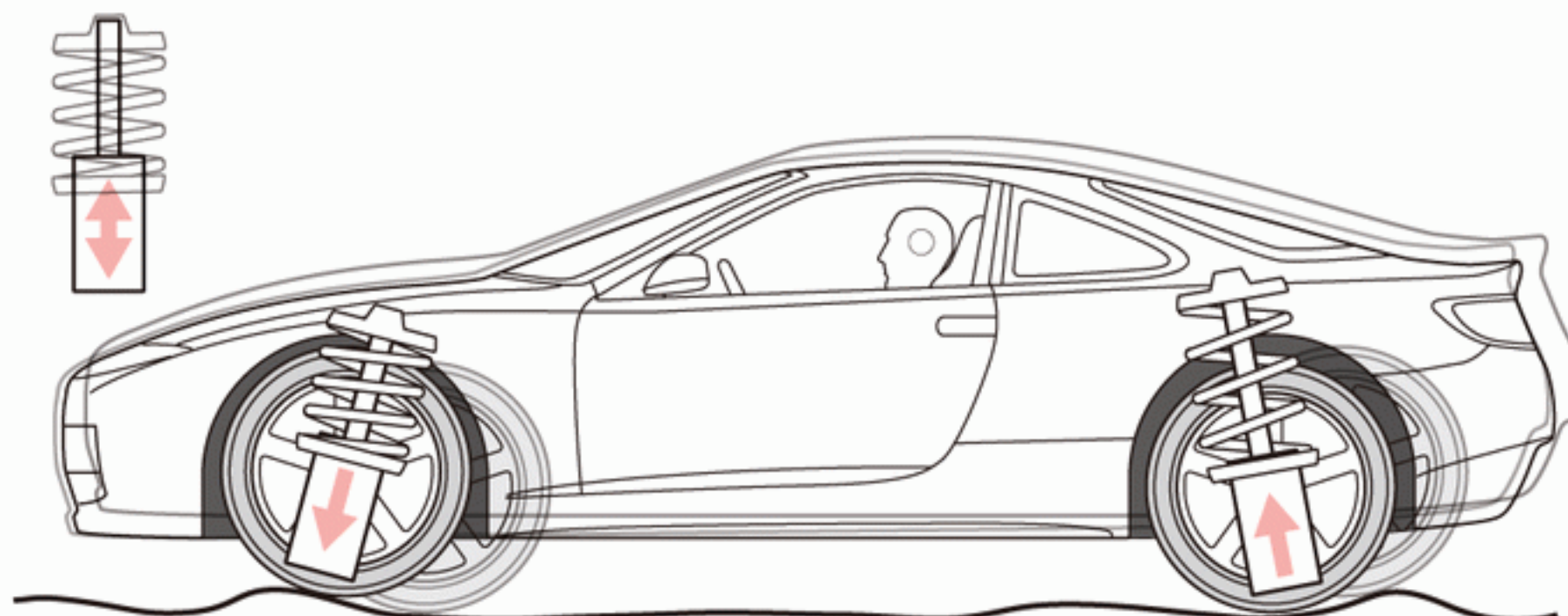
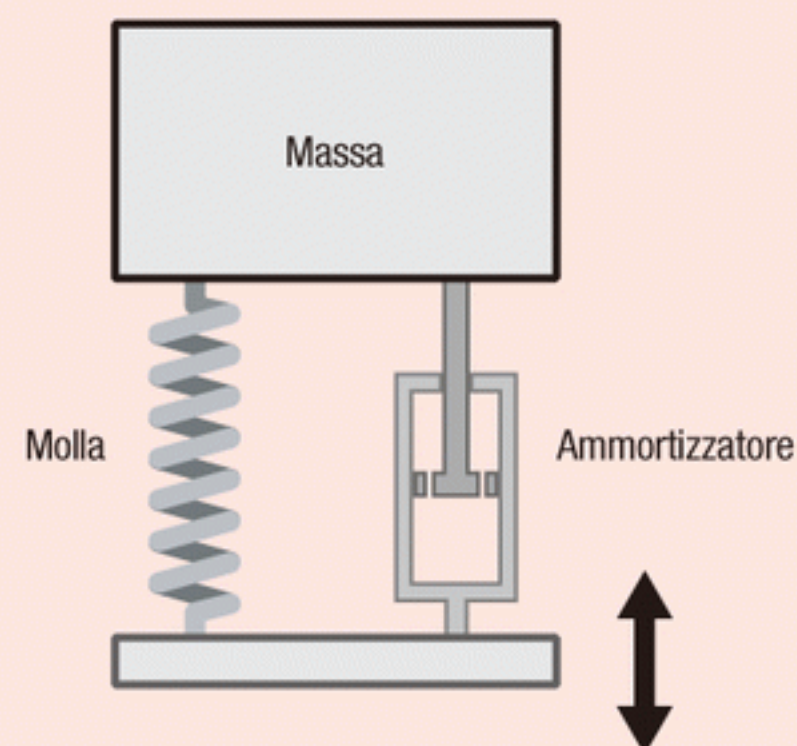
Figura 1-5-2 **Ammortizzatore delle sospensioni. Il rapporto di smorzamento è un indicatore importante durante la messa a punto delle sospensioni. Nelle normali vetture per il trasporto di persone, tale rapporto è compreso fra 0,1 e 0,3. Per le auto sportive si attesta attorno a 0,5, mentre per quelle da corsa arriva a 0,7 (nota: questi valori sono indicativi)**

SUGGERIMENTI Per impedire che le oscillazioni influenzino la base che supporta le strutture del macchinario oscillante e viceversa, spesso vengono utilizzati come supporti dei componenti in gomma, gomme, molle e ammortizzatori. Spesso i supporti appena citati vengono integrati in un modello del sistema oscillatorio, come mostrato nella figura 1-5-3, per capire come le oscillazioni influenzino il macchinario e la sua base. Per esempio, le sospensioni possono essere modellate e configurate insieme a molle, ammortizzatori e massa, considerando il tutto come una singola unità ai fini della valutazione delle caratteristiche delle oscillazioni. Tale argomento sarà approfondito nella seconda parte.

Figura 1-5-3 **Modello di oscillazione della base**

Massa
Molla
Ammortizzatore

1-6 Differenza di fase

▶ La differenza di fase è la differenza nel ritmo delle oscillazioni

Quando un veicolo affronta le ondulazioni della superficie stradale, queste vengono trasmesse al corpo vettura tramite le sospensioni, dopo essere state "ridotte". In tale caso, l'ampiezza del movimento del corpo vettura risulta minore rispetto alle ondulazioni. Considerando l'ondulazione della strada come un "input", è molto importante considerare la quantità di ampiezza, o "risposta", che viene soppressa per il corpo vettura. La teoria delle oscillazioni, però, non si esaurisce qui: è molto importante anche l'elemento noto come "velocità di risposta rispetto a un input".

Figura 1-6-1 L'ondulazione della superficie stradale e l'ampiezza dei movimenti del corpo vettura indotti tramite le sospensioni. Concentriamoci su questa relazione. La riduzione dell'ampiezza dei movimenti del corpo vettura è molto importante, come anche la conoscenza della velocità di risposta di quest'ultimo rispetto alle ondulazioni della superficie stradale

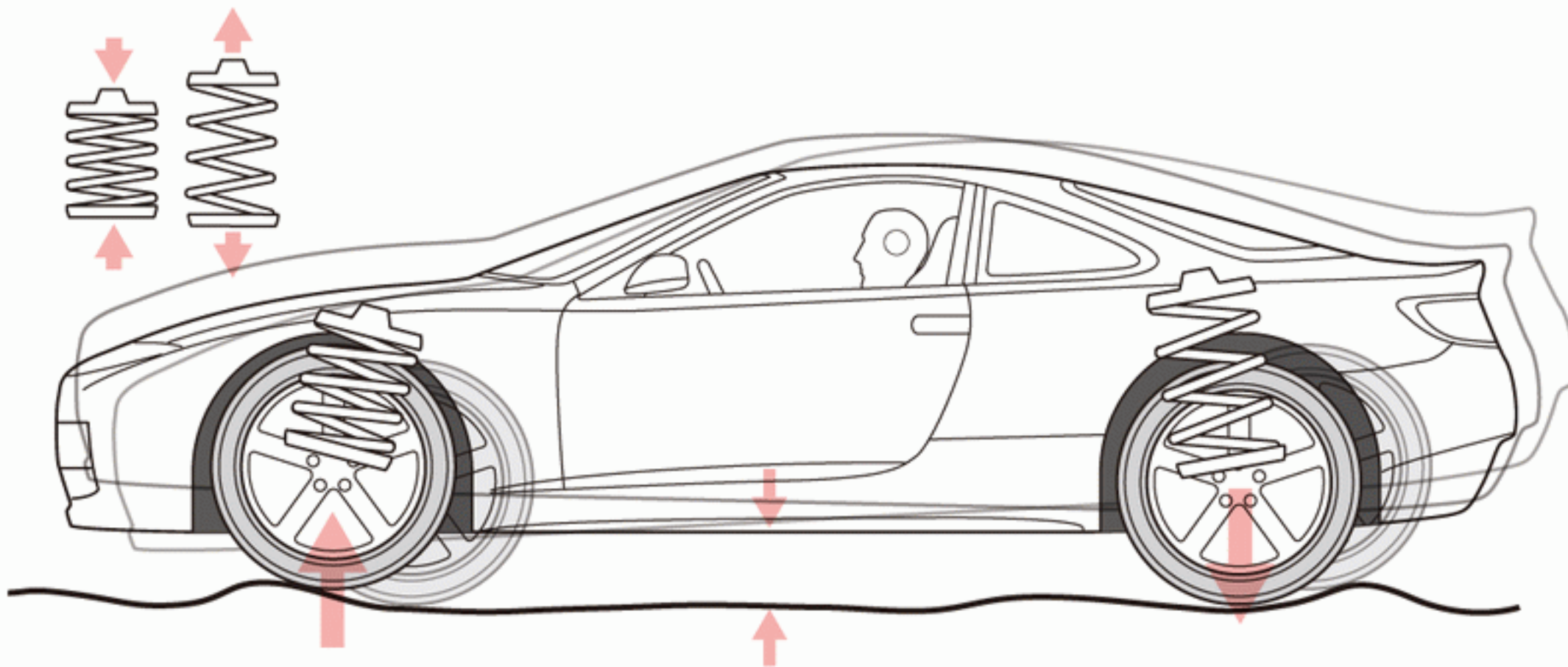
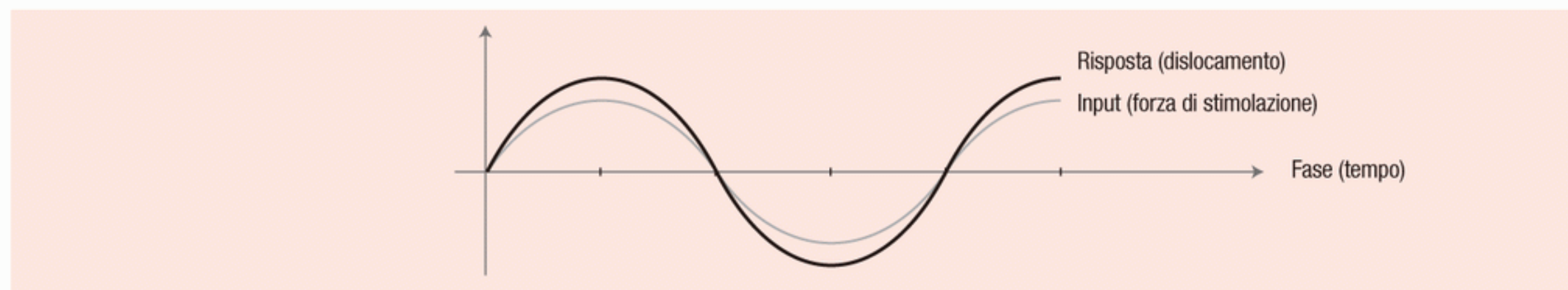
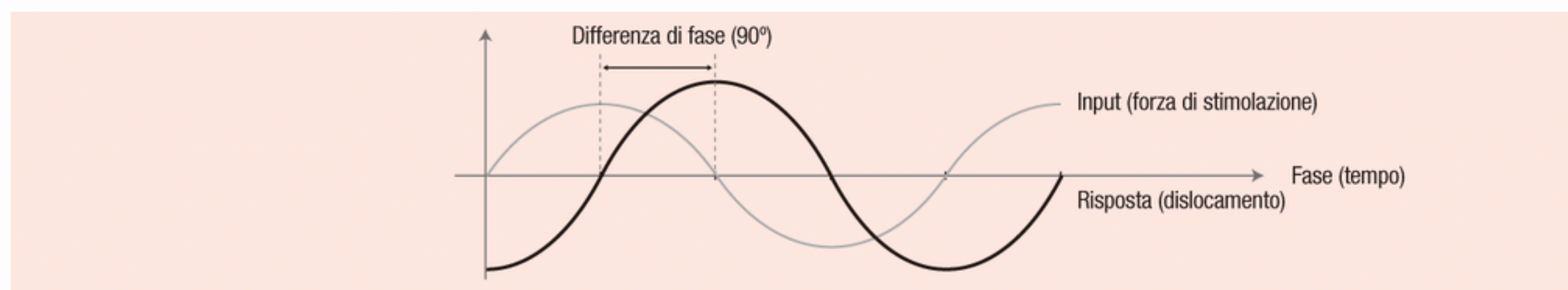
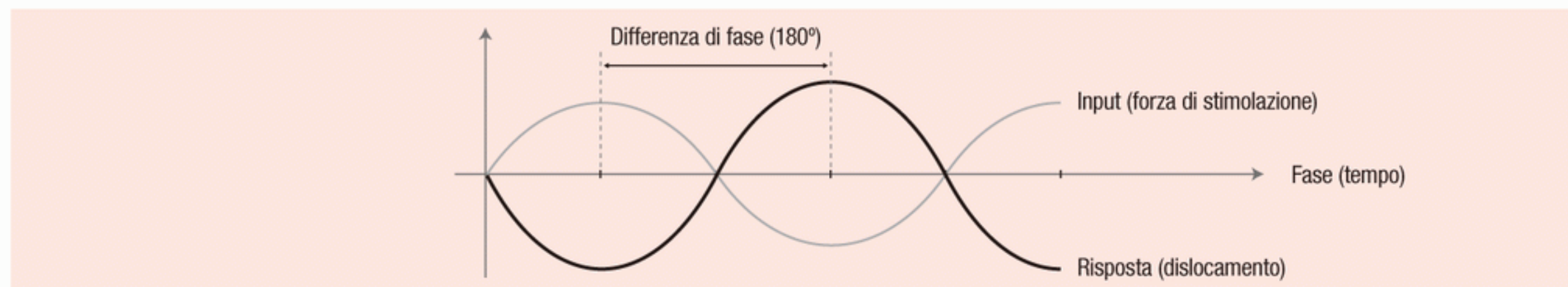



Figura 1-6-2 Sistema a 7 attuatori della casa produttrice di sospensioni tedesca KW (sotto la pavimentazione)

Figura 1-6-3

Se la frequenza di oscillazione della sollecitazione applicata è molto bassa, l'ampiezza delle fasi di input e di risposta risulta identica

La fase muterebbe di 90° se l'oscillazione avvenisse alla sua frequenza naturale

La differenza di fase muterebbe di 180° se la frequenza di oscillazione indotta dalla sollecitazione fosse notevolmente più elevata

Differenza del ritmo di oscillazione

La "differenza di fase" consente di valutare con che rapidità alcuni sistemi oscillanti reagiscono alle sollecitazioni. Ora ne discuteremo considerando un sistema oscillatorio con pesi e molle.

Per quale motivo avverti una resistenza, quando la tua mano applica una sollecitazione a una frequenza diversa da quella della molla e del peso (frequenza di risonanza)? Abbiamo spiegato prima che questo è dovuto al fatto che qualsiasi frequenza di oscillazione diversa da quella naturale è considerata innaturale e, di conseguenza, il sistema oscillante vi oppone resistenza. In alternativa, si può affermare che "il ritmo di oscillazione indotto dalla mano è diverso dal ritmo di oscillazione naturale del sistema". Per essere più specifici, la differenza nel ritmo è causata dalla "differenza fra la direzione dell'oscillazione imposta e la direzione d'inerzia del peso". Questa differenza nel ritmo viene definita "differenza di fase".

Osserva la figura 1-6-3. Quando imponiamo lentamente una sollecitazione oscillatoria, la direzione della forza indotta dalla mano e l'espansione e la contrazione della molla vanno nella stessa direzione seguendo lo stesso ritmo. Non esiste pertanto differenza fra input e risposta e in questa situazione la differenza di fase è 0 (figura 1-6-3, in alto). Se, invece, la frequenza della sollecitazione (input) aumenta considerevolmente, la differenza di fase arriva a 180 gradi, dato che la forza inerziale del peso e la forza di stimolazione indotta dalla mano agiscono in direzioni opposte (figura 1-6-3, in basso). Nota che la differenza di fase sarebbe pari a 90 gradi, se l'oscillazione avvenisse alla frequenza naturale (figura 1-6-3, al centro).

1-7 Risposta in frequenza

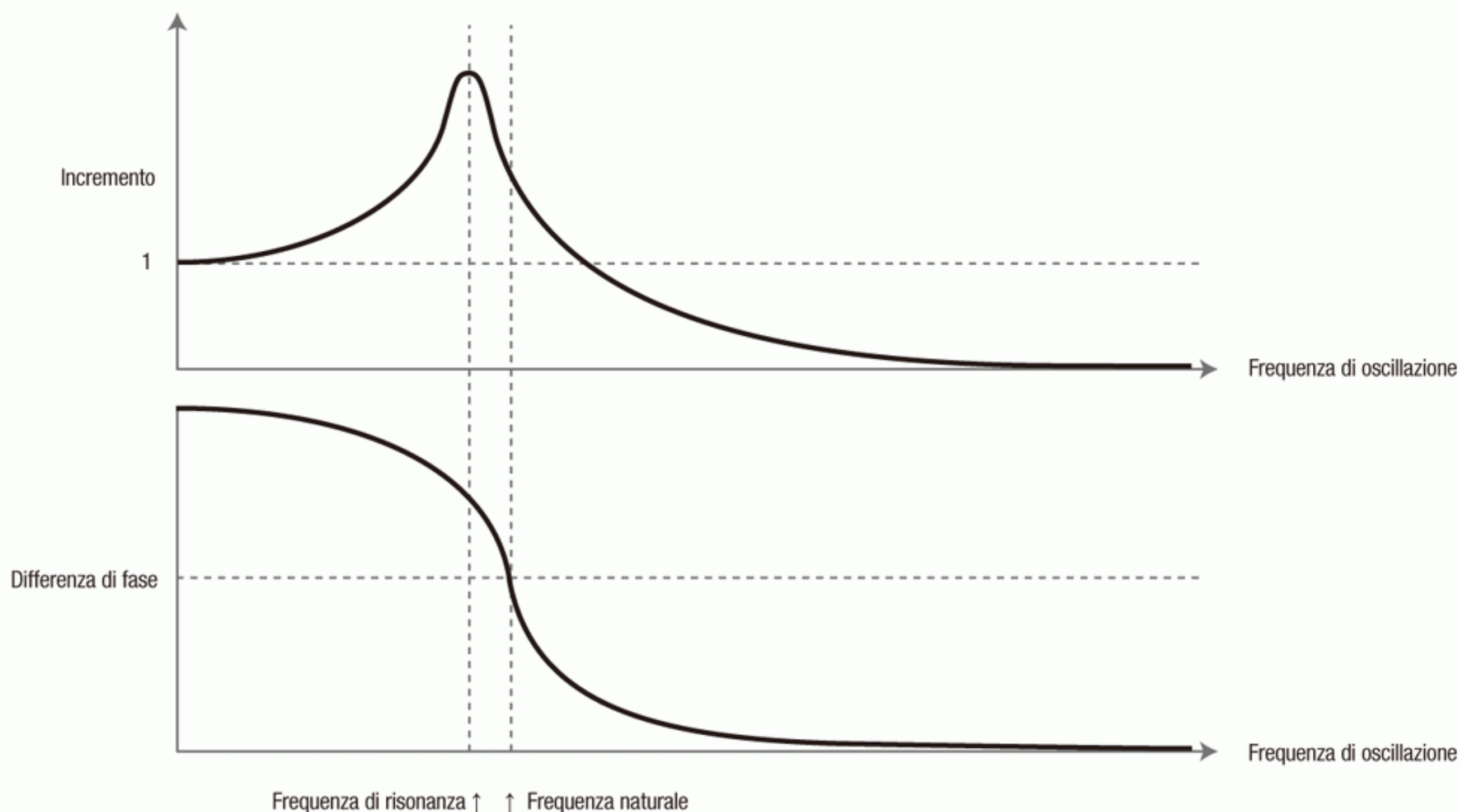
▶ Per l'analisi delle sospensioni e del movimento del veicolo

Comprendere la differenza in risposta alla stimolazione della frequenza

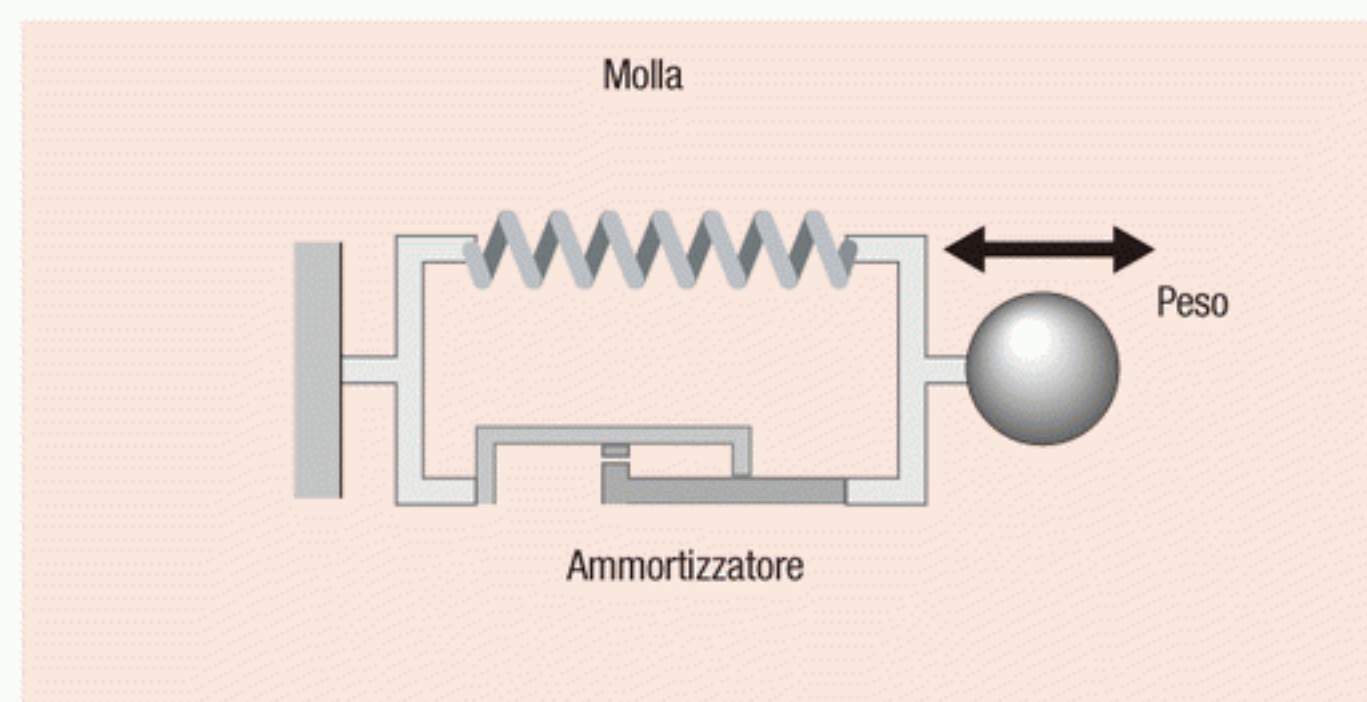
La risposta in termini di ampiezza e differenza di fase rispetto alla frequenza della sollecitazione (frequenza di oscillazione della sollecitazione) viene definita come risposta in frequenza. Finora abbiamo affrontato separatamente la differenza di fase e i cambi di ampiezza dovuti alla frequenza di oscillazione della stimolazione (frequenza): ora invece esamineremo come le risposte di fase e ampiezza del sistema di oscillazione cambiano a causa della frequenza della sollecitazione.

Nell'analisi delle oscillazioni di una vettura, la risposta in frequenza viene spesso analizzata tramite un diagramma di Bode. La figura 1-7-1 è un diagramma di Bode, mentre il grafico in alto si definisce diagramma d'ampiezza. Esso mostra l'ampiezza (incremento) della risposta alla frequenza di stimolazione (input). Il grafico nella parte bassa della figura 1-7-1 si definisce diagramma di fase e mostra la differenza di fase tra input e risposta.

Finora abbiamo considerato un sistema oscillatorio composto da un peso e una molla. Per rendere il tutto più sofisticato, prova a immaginare un sistema oscillatorio in cui sia presente anche un ammortizzatore (figura 1-7-2). Il rapporto di smorzamento sarà impostato su un valore inferiore a 1 o, in altro parole, di sotto-smorzamento.

Figura 1-7-1 Questo modello consiste di molla, ammortizzatore e peso. L'ammortizzatore è incorporato in parallelo con la molla, per evitare che l'ampiezza tenda a infinito in caso di risonanza

Rilevare le oscillazioni del sistema di ammortizzazione grazie al diagramma di Bode

Nell'ambito di questo modello, aumentiamo gradualmente la frequenza dell'oscillazione di sollecitazione, partendo dallo stato stazionario. Quando la frequenza è significativamente bassa, il rapporto d'ampiezza è 1 o, in altre parole, l'ampiezza della sollecitazione e quella della molla non presentano differenze. Da questo punto, con la frequenza che aumenta, l'ampiezza cresce e la differenza di fase diventa più ampia. Quando la frequenza della sollecitazione raggiunge una determinata soglia, l'ampiezza raggiunge il massimo e viene definita risonanza. Da questo punto in poi, l'aumento della frequenza ridurrà l'ampiezza, fino ad arrivare quasi a 0. D'altro canto, in relazione alla differenza di fase, quando la frequenza di oscillazione è molto bassa, stimolazione e molla si muovono con ritmo e direzione identiche, per cui il valore è zero, ma questo comporta -90 gradi di frequenza di oscillazione naturale. Con una frequenza di oscillazione estremamente elevata, la frequenza di oscillazione naturale si colloca a -180 gradi.

Figura 1-7-2 Diagramma di Bode che mostra la risposta in frequenza di un sistema oscillante smorzato composto da molla, ammortizzatore e peso

1-8 Oscillazione in sospensione

▶ Oscillazione in un sistema con più gradi di libertà

Abbiamo cercato di comprendere le basi delle vibrazioni utilizzando come esempio un semplice modello oscillatorio che combina, uno alla volta, ciascuno degli elementi oscillatori di una molla, un peso e un ammortizzatore. Una vera auto, però, è un sistema complesso, nel quale vengono combinate oscillazioni multiple di questi elementi. Osserviamo le caratteristiche di base degli elementi multipli nel sistema di controllo delle vibrazioni prima di andare ad attuare questo controllo, per esempio tramite la messa a punto delle sospensioni.

Caratteristiche oscillatorie della sospensione

Le sospensioni di un'automobile sono composte da diversi meccanismi che, essenzialmente, compongono un sistema oscillante e sono pertanto descrivibili come un sistema massa, molla e ammortizzatore, come mostrato nella figura 1-7-2. L'ammortizzatore e la molla situati fra la ruota e il corpo della vettura rappresentano quello che si definisce sistema di sospensioni dell'auto, mentre l'ammortizzatore e la molla situati fra superficie stradale e ruota sono le gomme.

Dimostriamo ora come le varie frequenze di oscillazione agiscono su questo modello (figura 1-8-2). Con una frequenza molto vicina alla condizione di riposo, il dislocamento di corpo vettura e quello di un'ondulazione stradale risultano identici, con rapporto d'ampiezza pari a 1. Da questo punto in poi, incrementando lentamente la frequenza, l'ampiezza aumenta di pari passo. Quando si raggiunge una determinata frequenza di oscillazione, l'ampiezza raggiunge il picco e si verifica la risonanza delle componenti oltre la molla. Se la frequenza sale ulteriormente, l'ampiezza cala, per poi tornare ad ampliarsi di nuovo a una frequenza più alta per via della risonanza delle componenti sotto la molla, che agisce anche sull'ampiezza del corpo vettura. Se la frequenza aumenta ancora, l'ampiezza torna a scendere fino ad avvicinarsi allo 0.

Figura 1-8-1 **Modello di una sola ruota (1/4 delle oscillazioni del veicolo). Gomma, molla e ammortizzatore hanno tutti le caratteristiche distinte di un sistema oscillante.**

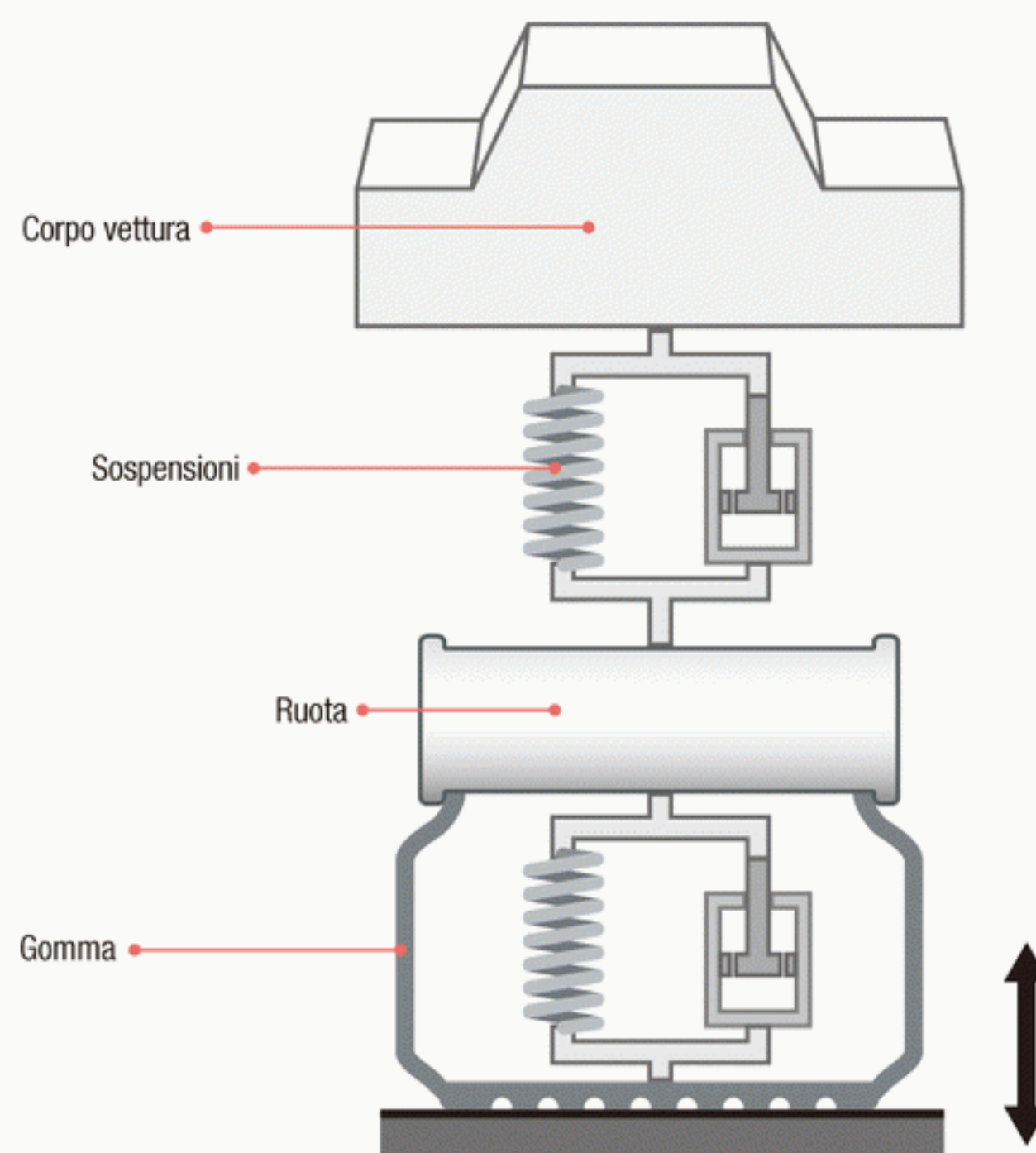
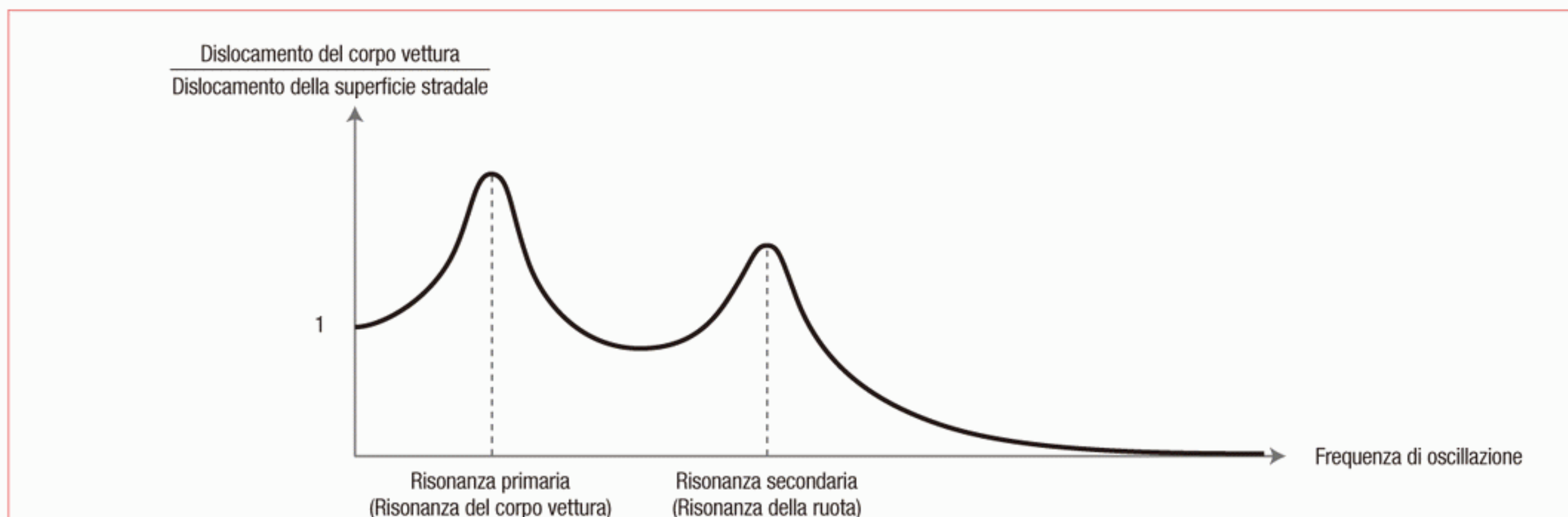



Figura 1-8-2 **Modifiche con l'incremento graduale della frequenza di oscillazione. La risonanza del corpo vettura si raggiunge a una frequenza di oscillazione relativamente bassa, mentre la risonanza della ruota avviene a frequenze più elevate.**

Dislocamento del corpo vettura / Dislocamento della superficie stradale
1
Frequenza di oscillazione
Risonanza primaria (Risonanza del corpo vettura)
Risonanza secondaria (Risonanza della ruota)

Modalità di oscillazione

Nell'esempio precedente la risonanza si è verificata due volte, ma in realtà può verificarsi più volte quando il sistema si muove in direzioni diverse. Il numero di direzioni nelle quali il sistema è in grado di muoversi liberamente si definisce "gradi di libertà". In questo caso, gomma e molla possono muoversi entrambe verso l'alto e verso il basso lungo una direzione, per cui sono coinvolte due frequenze naturali. Dato che possono verificarsi due tipi di risonanza, il sistema oscillatorio ha 2 gradi di libertà.

La risonanza iniziale si definisce "risonanza primaria", mentre la seconda prende il nome di "risonanza secondaria". La risonanza in una macchina generalmente si verifica in un numero illimitato di circostanze, ma quella che dev'essere tenuta in considerazione nella progettazione è la risonanza di basso grado, mentre quella di grado elevato viene solitamente ignorata. In altre parole, in questo esempio, la risonanza di ciò che sta sopra la molla è più importante della risonanza delle componenti che le stanno sotto. Questo perché, anche in presenza dello stesso livello di energia oscillatoria, l'ampiezza a bassa frequenza tende a essere maggiore: dato che queste componenti dominano il fenomeno dell'intero sistema, finiscono per determinare la maggior parte delle caratteristiche di oscillazione.

Figura 1-8-3 **Esecuzione della valutazione delle sospensioni sulla GT-R che ha gareggiato al Nürburgring, con verifica delle sospensioni a diverse frequenze di oscillazione e analisi della risposta in frequenza**

2-1 Dinamica delle gomme

▶ Comprendere le forze generate dalle gomme

Forza angolare

Il tipo di forza che deforma un oggetto con tipologia di taglio si definisce "sforzo di taglio", mentre la proprietà dell'oggetto stesso che contrasta tale forza è il modulo di taglio. Quando una gomma viene sottoposta ad uno sforzo di taglio trasversale si deforma lateralmente come in figura 2-1-1: nello stesso tempo, però, il modulo di taglio della gomma contrasta lo sforzo di taglio. Questa proprietà della gomma nel contrastare la deformazione è quella che genera la forza che consente all'auto di accelerare, decelerare e svoltare.

Esaminiamo il tutto in modo più ravvicinato. La figura 2-1-2 mostra una sezione di una gomma in fase di curva. Come puoi vedere, esiste una differenza fra la direzione di rotazione della gomma e la direzione di spostamento della vettura. In altre parole, l'interazione della gomma con la superficie stradale genera una forza e la gomma, mentre ruota, viene sottoposta a una deformazione laterale. L'angolo fra piano di rotazione e la direzione di spostamento si definisce angolo di slittamento. La forza che agisce perpendicolarmente alla direzione di spostamento si definisce forza angolare. Un'auto può cambiare direzione grazie alla forza angolare generata dalla gomma.

In generale, se il modulo di taglio è più elevato, si può generare una forza angolare più elevata partendo dallo stesso angolo di slittamento. Detto questo, un modulo di taglio eccessivamente alto può saturare l'attrito anche con un piccolo angolo di slittamento, cosa che potrebbe restituire sensazioni errate al guidatore. Se invece il modulo di taglio è troppo basso, la deformazione della gomma risulta estrema e questo può mettere a disagio, trasmettendo una sensazione di insicurezza.

Figura 2-1-1 **Sezione di una gomma che illustra la deformazione e la forza. In generale, un modulo di taglio più elevato fornisce una forza angolare più grande.**

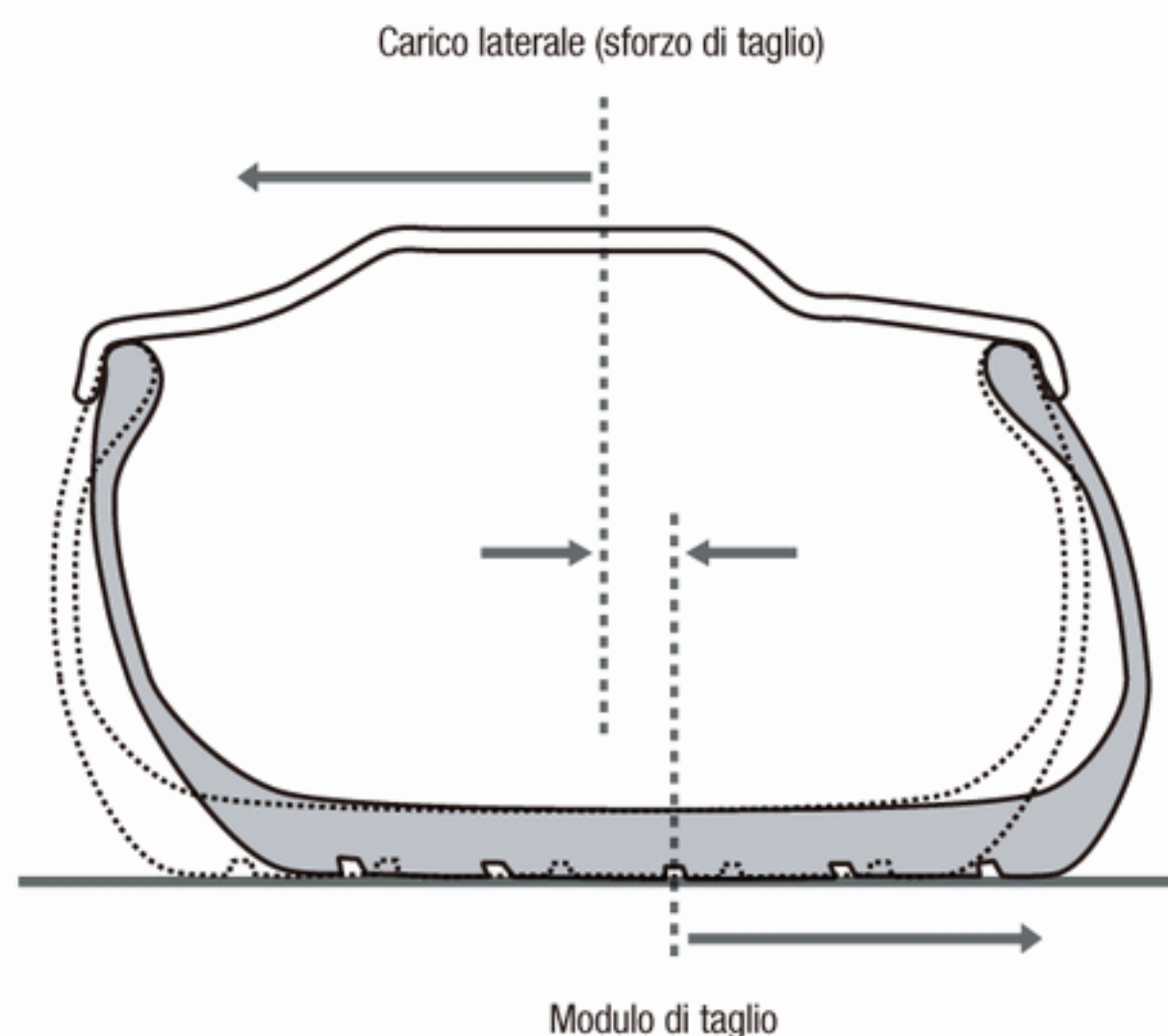
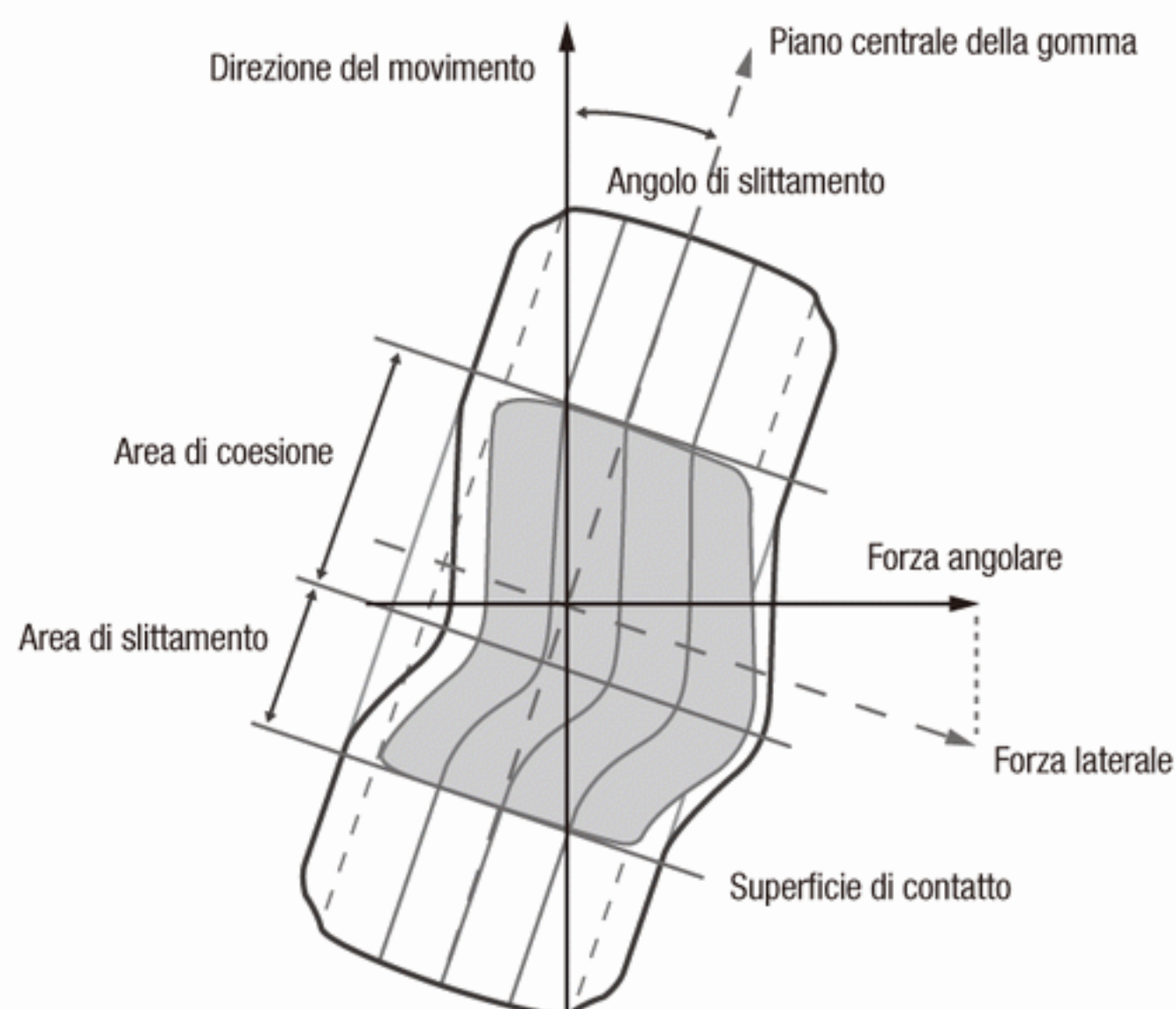



Figura 2-1-2 **Vista dall'alto di una gomma illustrante il rapporto fra deformazione e forza. La forza laterale si esercita in modo perpendicolare al piano centrale della gomma. La forza angolare è una componente della forza laterale che agisce perpendicolarmente rispetto alla direzione di movimento.**

Rapporto fra forza angolare e angolo di slittamento

La figura 2-1-3 mostra il rapporto fra angolo di slittamento e forza angolare. Quando l'angolo di slittamento è piccolo, la forza angolare mostra un incremento lineare. Al crescere dell'angolo di slittamento, però, la forza angolare raggiunge il livello di saturazione. Questa variazione della forza angolare viene definita potenza angolare. Una gomma che crea una forza angolare elevata, con un piccolo angolo di slittamento, si può definire con elevata potenza angolare.

Figura 2-1-3 **Correlazione tra angolo di slittamento e forza angolare. La potenza angolare è elevata se l'angolo di slittamento è relativamente basso. Se quest'ultimo raggiunge e supera un determinato valore, la potenza angolare cessa di aumentare.**

Forza angolare
Variazione della forza angolare / Variazione dell'angolo di slittamento
=
Potenza angolare
Angolo di slittamento

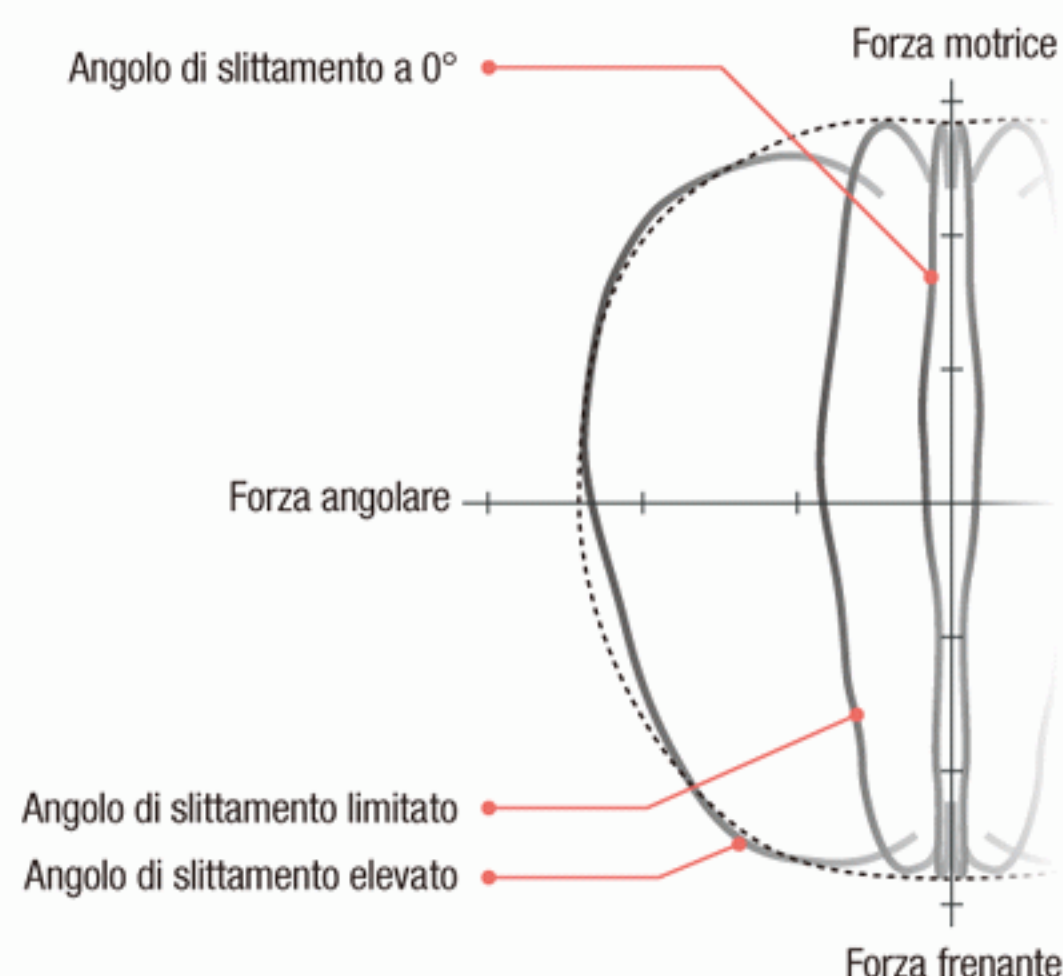
Pressione di gonfiaggio e potenza angolare

In generale, quando la pressione dell'aria è relativamente bassa, il modulo di taglio aumenta con il suo incremento, andando così a migliorare la potenza angolare. Va però rilevato che l'aumento della pressione dell'aria riduce l'area di contatto della gomma: questo significa che modulo di taglio e area di contatto risultano conflittuali, in questa situazione. Con carico verticale ridotto, il calo dell'area di contatto della gomma derivante dall'aumento della pressione dell'aria è superiore all'incremento del modulo di taglio: questo comporta un calo della potenza angolare. Al contrario, con carico verticale elevato, l'incremento del modulo di taglio derivante dalla maggiore pressione dell'aria diventa dominante, aumentando così la forza angolare. Per ottimizzare la forza angolare occorre considerare e bilanciare con attenzione le caratteristiche della gomma e il carico.

Forza laterale della gomma associata con guida e frenata

Osservando la gomma dall'alto, la forza di aderenza creata perpendicolarmente alla direzione di rotazione della ruota si definisce forza laterale. Occorre comprendere che questa forza laterale è collegata alla guida e all'uso del freno del veicolo: quando si premono acceleratore e freno, la forza di aderenza della gomma viene utilizzata per la guida e la frenata e ciò comporta una riduzione della quantità di forza laterale che può essere generata, anche con angoli di slittamento identici. Questo è illustrato nella figura 2-1-4. Anche se si definisce circolo dell'attrito, la figura è, in realtà, un ovale: non è perfettamente rotondo, dato che gli attriti longitudinale e laterale agiscono in modo diverso sulla gomma. Considerato che un'auto da corsa è continuamente soggetta a fasi di accelerazione e frenata, l'attrito che si verifica nella direzione diagonale influenza notevolmente i tempi sul giro.

Figura 2-1-4 **Circolo dell'attrito. La forza angolare della gomma è influenzata dall'angolo di slittamento. Il perimetro ovale del circolo dell'attrito indica la massima forza angolare.**

Angolo di slittamento a 0°
Forza motrice
Forza angolare
Angolo di slittamento limitato
Angolo di slittamento elevato
Forza frenante

2-2 Guida circolare stazionaria

▶ La sterzata dipende dall'equilibrio tra i momenti delle ruote anteriori e posteriori

Definizione di equilibrio dello sterzo

Quando un'auto viene guidata con angolo di sterzata e velocità costanti, traccia un percorso circolare con raggio fisso. Questa situazione viene definita guida circolare stazionaria e viene spesso utilizzata nell'ambito della dinamica automobilistica. L'osservazione di un'auto in guida circolare stazionaria può mettere in luce le proprietà fondamentali del movimento del veicolo.

Per esempio, immagina che in un'auto in guida circolare stazionaria la velocità venga incrementata gradualmente. Se il momento meccanico delle ruote anteriori dovesse diminuire mentre l'auto accelera, il raggio di curvatura aumenterebbe con la velocità (la guida risulterebbe più ampia). Questo significa che l'angolo di sterzata dev'essere aumentato per restare sul percorso originario della guida circolare.

Al contrario, se il momento meccanico delle ruote anteriori dovesse aumentare, il raggio di sterzata diminuirebbe mentre l'auto accelera (la linea di guida risulterà più stretta) e sarà necessario ridurre l'angolo di sterzata per restare sul percorso originario. La condizione di mancanza di angolo di sterzata in fase di aumento di velocità si definisce sovrasterzo, mentre il surplus di angolo di sterzata è il sottosterzo. Quando il raggio di svolta può essere mantenuto senza alcuna influenza delle variazioni della velocità, si parla di sterzo neutro. Questi diversi stati dello sterzo sono definiti nell'insieme caratteristiche di sterzata. Vale la pena notare che un'auto con sovrasterzo raggiungerà un raggio di svolta pari a "0" a una certa velocità (figura 2-2-2). Questo significa che l'auto si trova in condizione di testacoda. La velocità alla quale l'auto entra nel testacoda si definisce velocità di stabilità critica.

Figura 2-2-1 Modifiche nel movimento circolare del veicolo all'aumentare della velocità

Sovrasterzo: momento della ruota anteriore > momento della ruota posteriore
Sottosterzo: momento della ruota anteriore < momento della ruota posteriore
Sterzo neutro: momento della ruota anteriore = momento della ruota posteriore

Figura 2-2-2 Correlazione fra velocità e raggio di curvatura con angolo di sterzata stabile

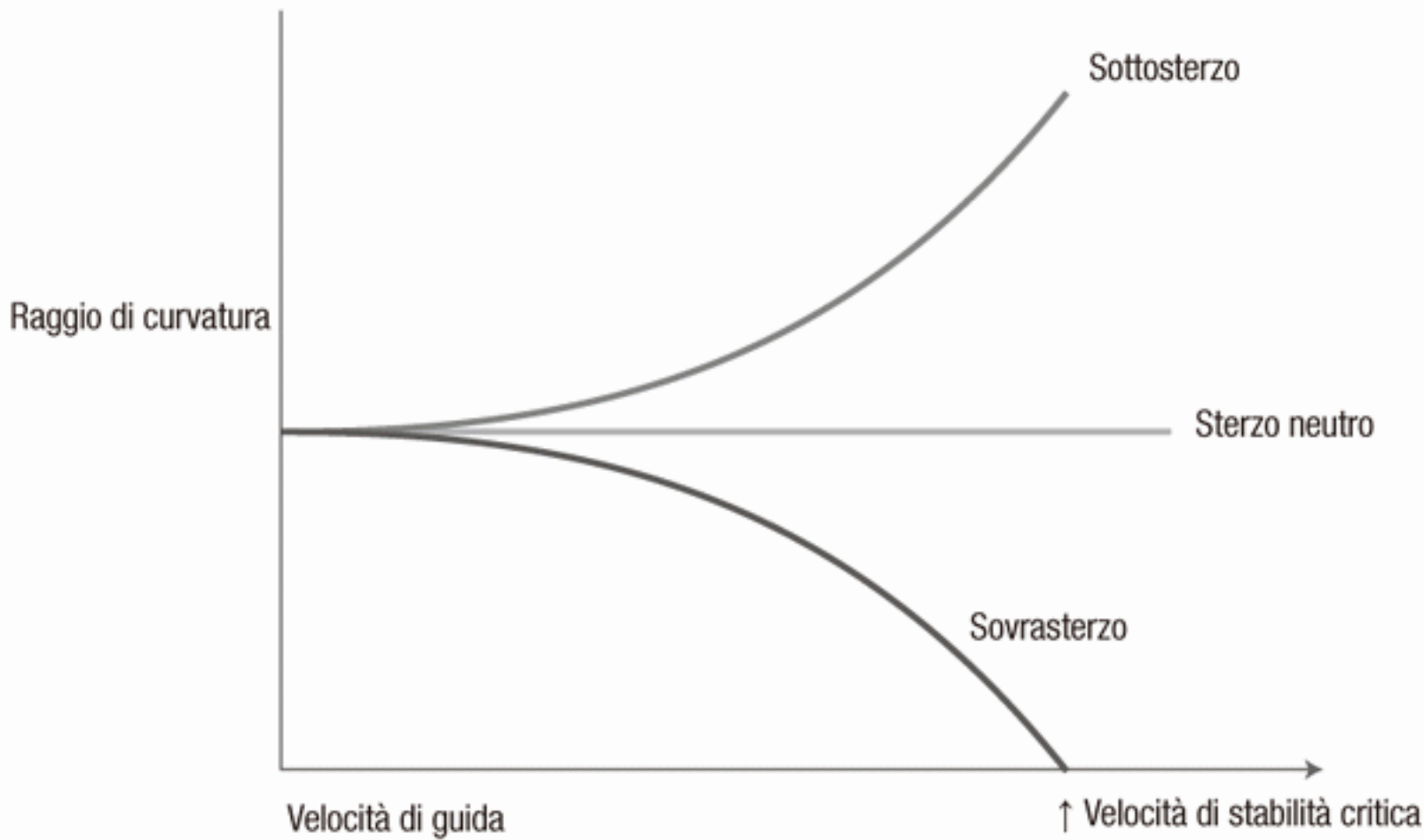



Grafico 2-2-1 Caratteristiche di sterzata

	Sottosterzo	Sterzo neutro	Sovrasterzo
M : momento di sterzata della vettura	M ruota anteriore < M ruota posteriore	M ruota anteriore = M ruota posteriore	M ruota anteriore > M ruota posteriore
β : angolo di slittamento	β ruota anteriore > β ruota posteriore	*β ruota anteriore = β ruota posteriore*	β ruota anteriore < β ruota posteriore

Rapporto fra caratteristiche di sterzata e angolo di slittamento

Esiste un interessante collegamento fra l'angolo di slittamento delle ruote anteriori e posteriori (β ruota anteriore, β ruota posteriore) e le caratteristiche di sterzata. Fai riferimento alla figura 2-2-3. In una fase di guida circolare fissa, se l'angolo di slittamento anteriore e posteriore è β ruota anteriore > β ruota posteriore si verifica il sottosterzo, con β ruota anteriore = β ruota posteriore lo sterzo è neutro, con β ruota anteriore < β ruota posteriore si ha il sovrasterzo. Questi collegamenti rimangono validi anche in presenza di una forza laterale diversa dalla forza angolare, e a prescindere dalla proporzionalità della forza angolare all'angolo di slittamento. Il collegamento, con un'auto in guida circolare stazionaria, risulta geometricamente stabile.

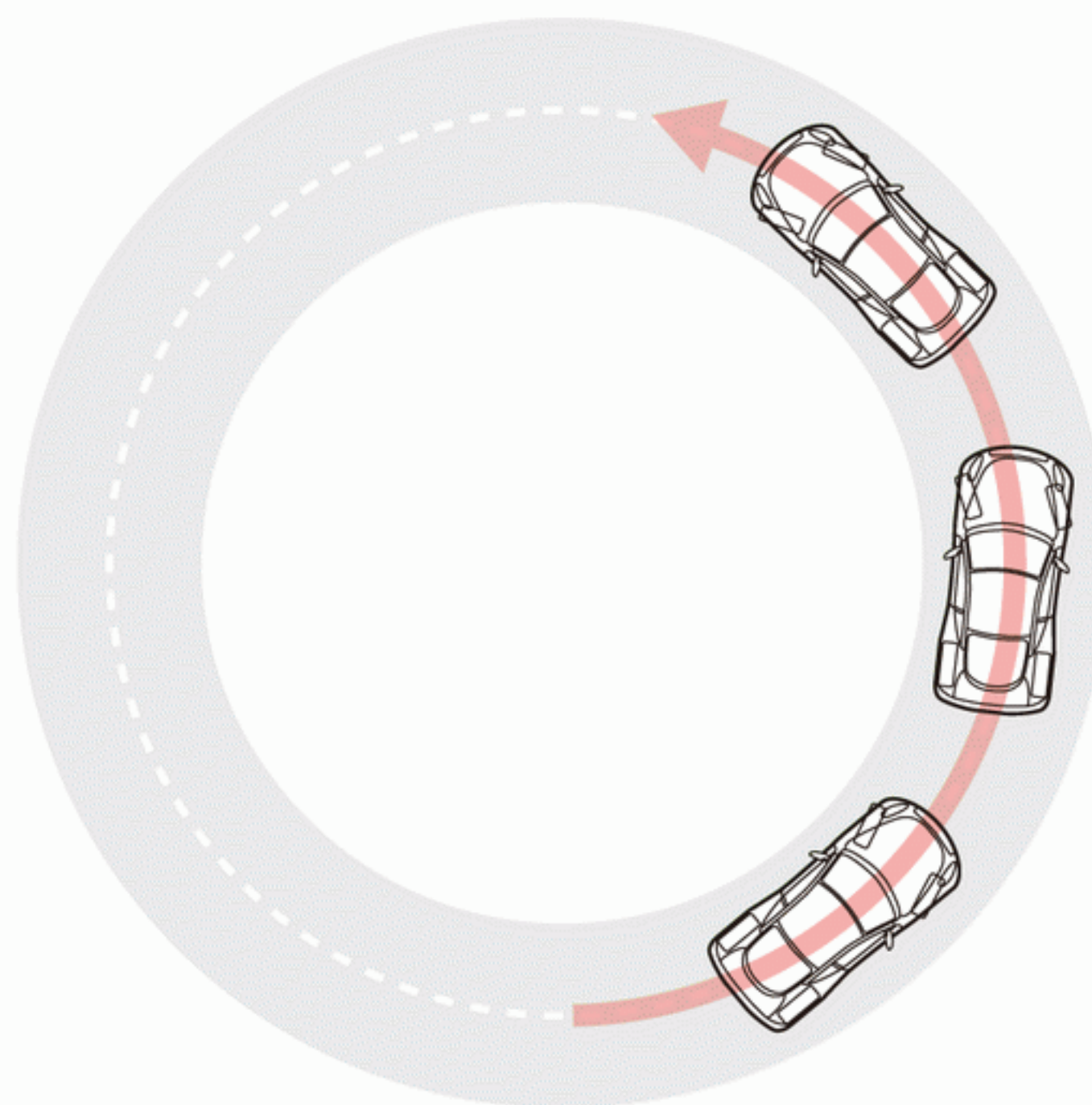
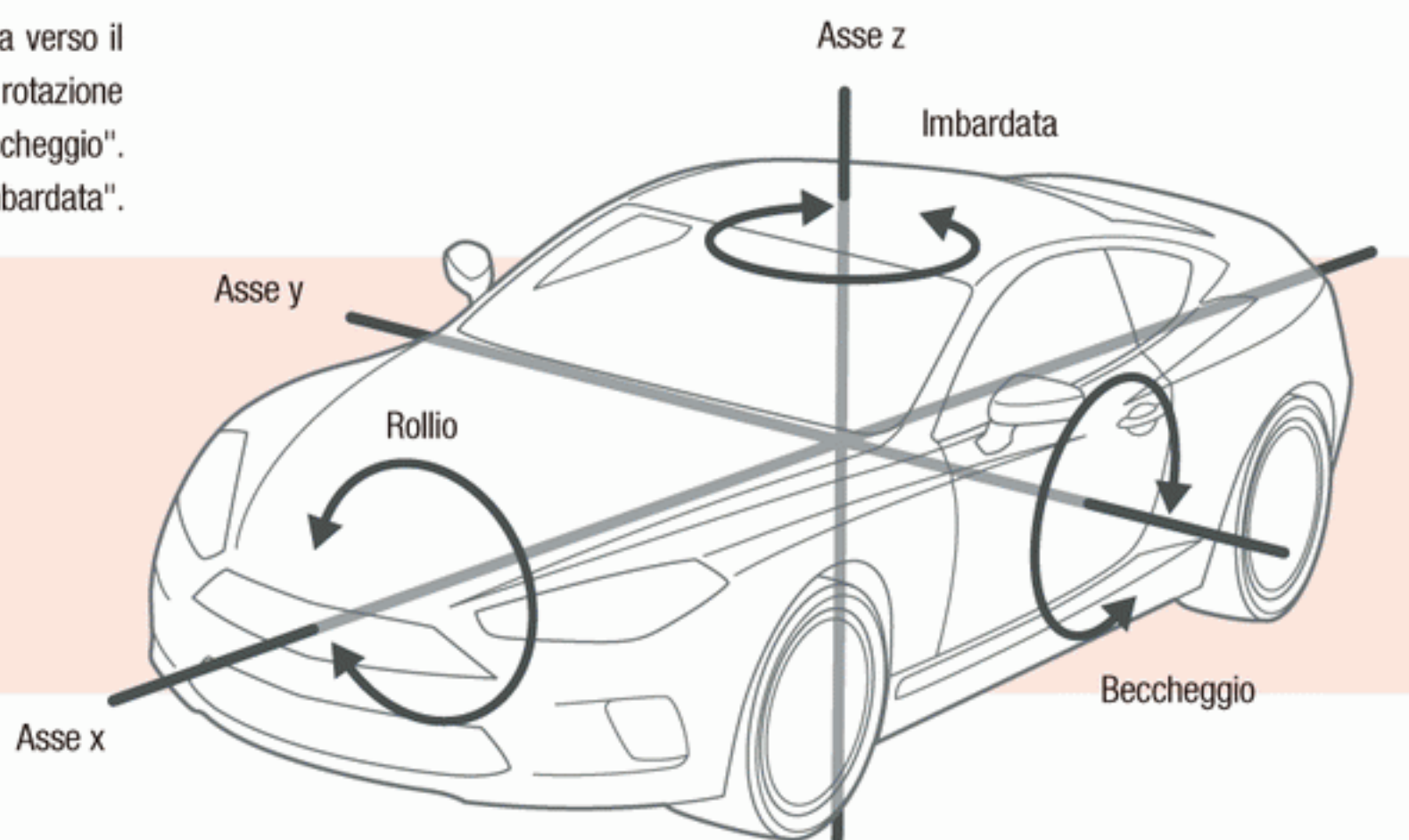
Figura 2-2-3 Le caratteristiche di sterzata cambiano a seconda della differenza nell'angolo di slittamento delle gomme anteriori e posteriori

SUGGERIMENTI Quando si parla di sterzata e movimenti delle sospensioni, la forza derivata dal veicolo viene spesso classificata in tre movimenti rotatori, come mostrato nella figura 2-2-4. Il primo è una rotazione che si verifica verso il centro della lunghezza del veicolo (asse x), definita anche "rollio". Il secondo è una rotazione che si verifica verso il centro della larghezza del veicolo (asse y), ed è definita "beccheggio". L'ultimo è una rotazione verso il centro dell'altezza del veicolo (asse z), definita "imbardata". Questi termini vengono utilizzati frequentemente, quindi è opportuno memorizzarli.

Figura 2-2-4 I tre movimenti rotatori che si verificano su un veicolo

2-3 Risposta di un'auto alla variazione dell'angolo di sterzata

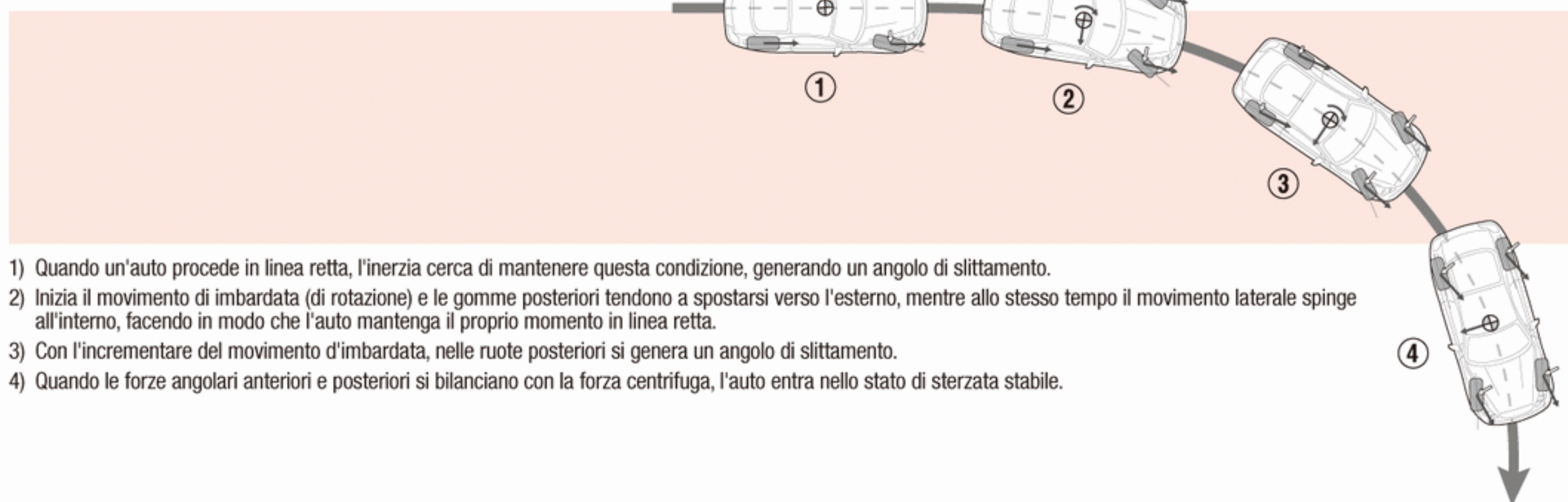
▶ Il movimento automobilistico è un fenomeno oscillatorio

Meccanismo di ingresso in curva

L'osservazione di un'auto in fase di guida circolare stazionaria mette in luce i fondamenti del movimento veicolare. Rivela inoltre come l'auto reagisce ai cambiamenti nell'angolo di sterzata, il che è un altro fattore importante nell'analisi del movimento del veicolo.

Usando la figura 2-3-1 esaminiamo passo per passo il meccanismo di ingresso in curva. (1) Quando lo sterzo di un'auto in moto rettilineo viene girato, il momento iniziale dell'auto tende a mantenerla dritta. In quest'istante viene creato un angolo di slittamento fra la direzione verso la quale sono indirizzate le ruote anteriori e il momento dell'auto, che procede diritto: questo genera una forza angolare. Dato che la forza angolare si accompagna alla deformazione della gomma, il tutto avviene con un minimo ritardo temporale. (2) La presenza della forza angolare dà inizio al movimento di imbardata (di rotazione): nello stesso tempo, però, le ruote posteriori procedono diritte, per il momento d'inerzia originale. (3) Dopo alcuni istanti, anche sulle ruote posteriori si genera un angolo di slittamento e, di conseguenza, una forza angolare. (4) Quando le forze angolari anteriori e posteriori si stabilizzano, la velocità d'imbardata assume un valore definito e l'auto raggiunge una condizione di sterzata stabile.

Occorre comprendere che il movimento di imbardata non si verifica in modo simultaneo rispetto al movimento di sterzata: esiste una leggera differenza di fase, legata al rapporto fra il momento inerziale dell'auto e la generazione di forza angolare nelle gomme.

Figura 2-3-1 Meccanismo di ingresso in curva

1) Quando un'auto procede in linea retta, l'inerzia cerca di mantenere questa condizione, generando un angolo di slittamento.
2) Inizia il movimento di imbardata (di rotazione) e le gomme posteriori tendono a spostarsi verso l'esterno, mentre allo stesso tempo il movimento laterale spinge all'interno, facendo in modo che l'auto mantenga il proprio momento in linea retta.
3) Con l'incrementare del movimento d'imbardata, nelle ruote posteriori si genera un angolo di slittamento.
4) Quando le forze angolari anteriori e posteriori si bilanciano con la forza centrifuga, l'auto entra nello stato di sterzata stabile.

Caratteristiche di sterzata e risposta della vettura

La risposta dell'auto ai movimenti dello sterzo da parte del guidatore dipende dalle caratteristiche di sterzata e dalla velocità dell'auto. La figura 2-3-2 illustra come l'auto risponde a un'azione dello sterzo a impulsi (sterzata decisa e poi rilascio). Un'auto con sottosterzo, quando viene guidata al di sopra di una certa velocità, diventa inizialmente instabile per poi raggiungere gradualmente uno stato stazionario. Un'auto con sterzo neutrale non diventa instabile, ma raggiunge immediatamente lo stato stazionario. Un'auto con sovrasterzo, invece, va subito in testacoda non appena viene superata la velocità di stabilità critica. Queste diverse reazioni sono riepilogate nel grafico 2-3-1.

Le auto con sottosterzo o sterzo neutrale raggiungono una condizione stabile: un'auto con sovrasterzo, invece, perderà stabilità al raggiungimento di una velocità superiore alla velocità di stabilità critica.

Figura 2-3-2 **Grafico della traiettoria circolare del veicolo e della velocità d'imbardata in condizioni di sterzata a impulsi**

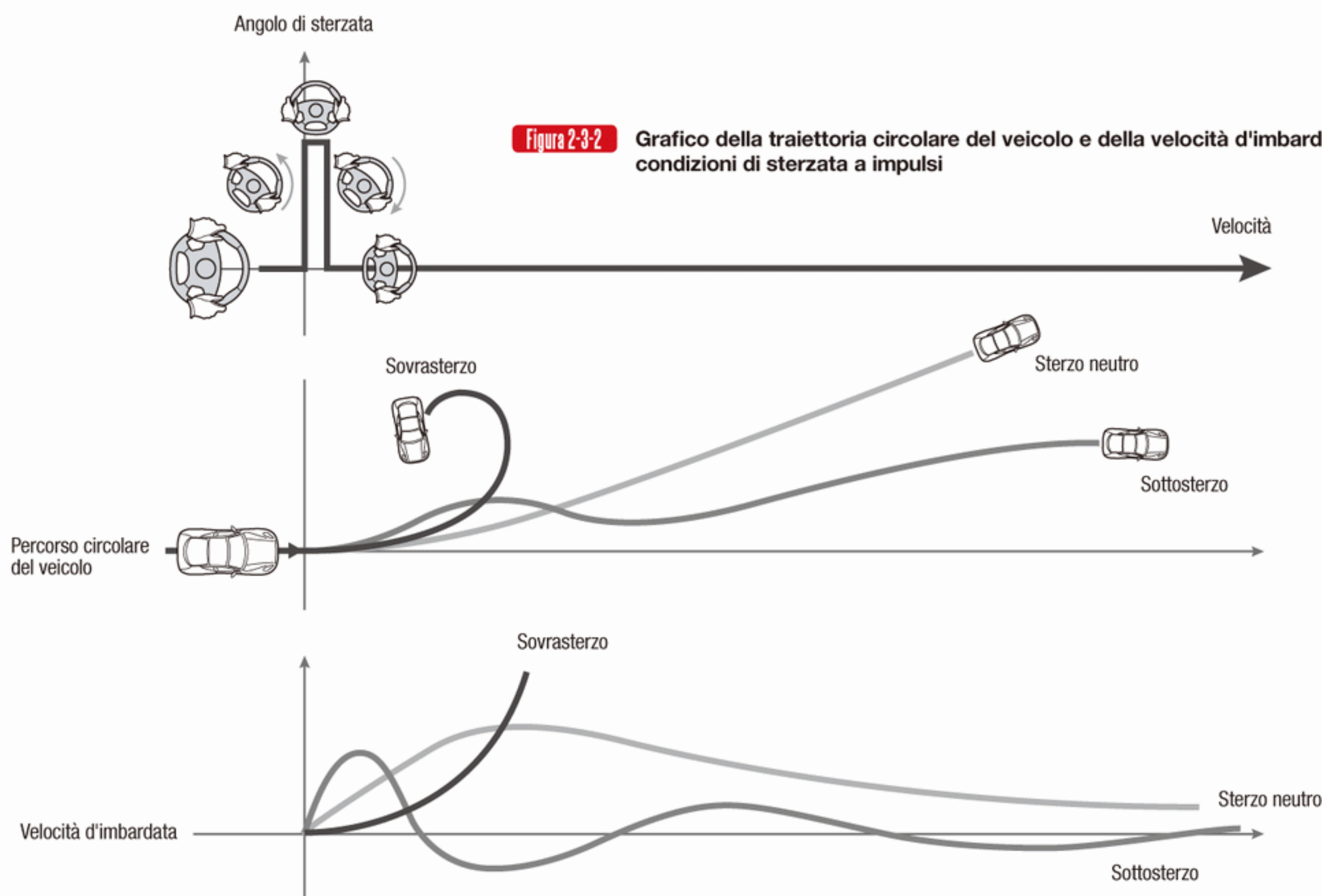



Grafico 2-3-1

Sottosterzo		Smorzamento oscillatorio
Sterzo neutro	Smorzamento non oscillatorio	
Sovrasterzo		Testacoda

↑ Velocità di stabilità critica Velocità →

Riepilogo della risposta di vetture con diverse caratteristiche di sterzata: sottosterzo, sterzo neutrale e sovrasterzo. Un'auto con sovrasterzo va in testacoda una volta superata la velocità di stabilità critica.

Applicazione della teoria oscillatoria al movimento del veicolo

Ricorda la differenza di oscillazione associata al rapporto di smorzamento spiegata nella sezione 1-5. In quella sezione abbiamo confermato che il sotto-smorzamento si verifica con rapporto di smorzamento inferiore a 1, il che significa che la risposta diventa oscillatoria. Se il rapporto di smorzamento è superiore a 1, vale a dire se si attua lo stato di sovra-smorzamento, la risposta è ammortizzata senza oscillazioni. Quando il rapporto di smorzamento è uguale a 1, ci si trova in uno stato di smorzamento critico. Qui si comprende che il comportamento dei componenti oscillatori, vale a dire massa, molla e ammortizzatore, riflette quello dell'intera vettura.

La componente oscillatoria di massa, molla e ammortizzatore e la dinamica della vettura si possono considerare entrambe dal punto di vista di concetti astratti, come rapporto di smorzamento e frequenza di risonanza (o frequenza naturale). Si può riscontrare che non esistono differenze e che entrambi possono essere considerati sistemi oscillatori. In altre parole, il movimento del veicolo è un tipo di fenomeno oscillatorio.

A titolo di esempio, osserva la figura 2-3-2. Lo smorzamento dell'imbardata di un'auto con sottosterzo ha un rapporto di smorzamento inferiore a 1: questo significa che la risposta è oscillatoria. Lo smorzamento dell'imbardata di un'auto con sovrasterzo presenta rapporto di smorzamento superiore a uno, generando una risposta non oscillatoria. Lo smorzamento dell'imbardata di un'auto con sterzo neutro si trova nello stato di smorzamento critico, con rapporto di smorzamento pari a 1: in questo caso la risposta è non oscillatoria. (L'espressione smorzamento dell'imbardata fa riferimento all'effetto del movimento ammortizzante di imbardata).

2-4 Risposta del veicolo ai movimenti periodici dello sterzo

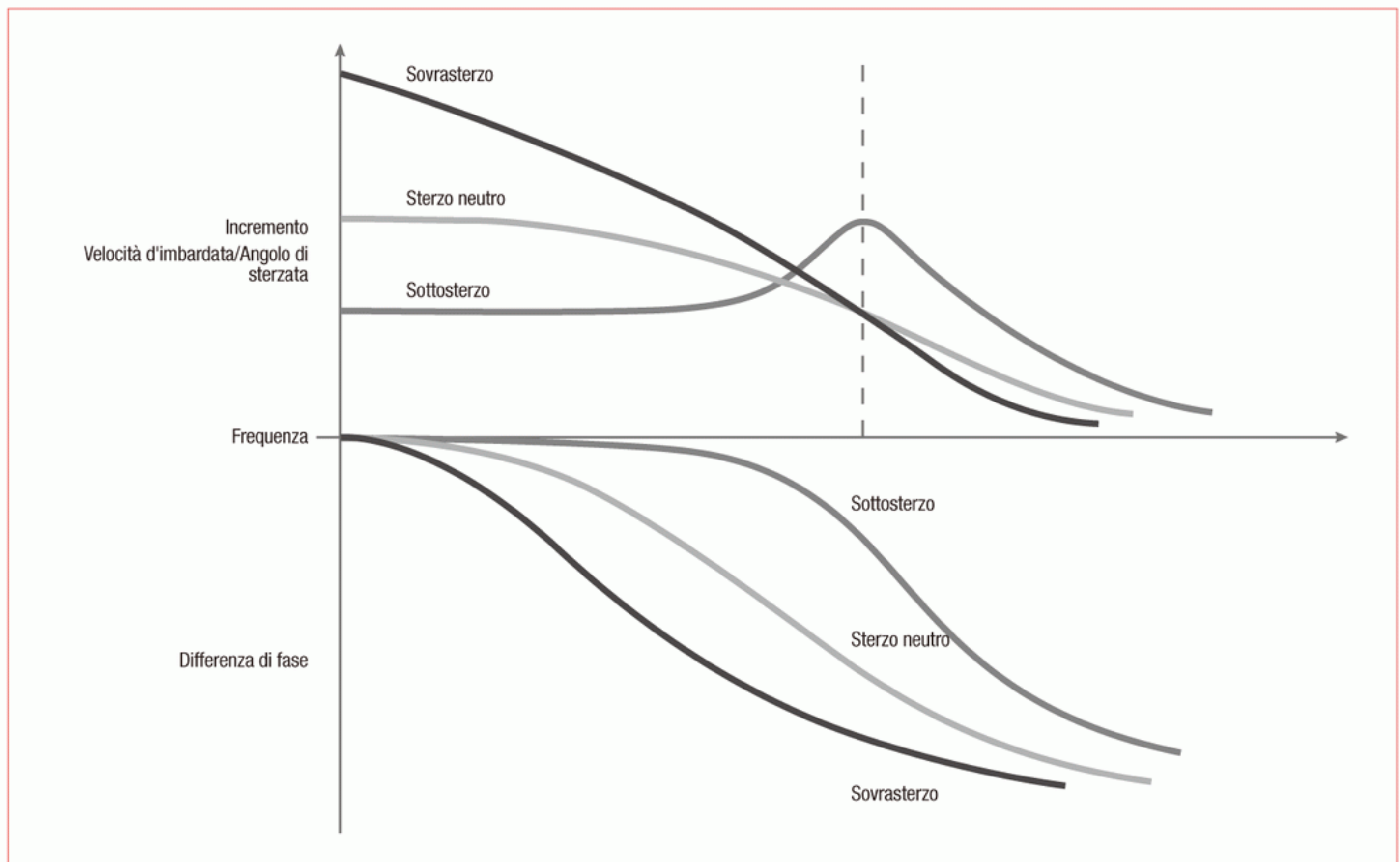
▶ Comprendere le caratteristiche del veicolo grazie al diagramma di Bode

Caratteristiche di sterzata e risposta a sterzate periodiche

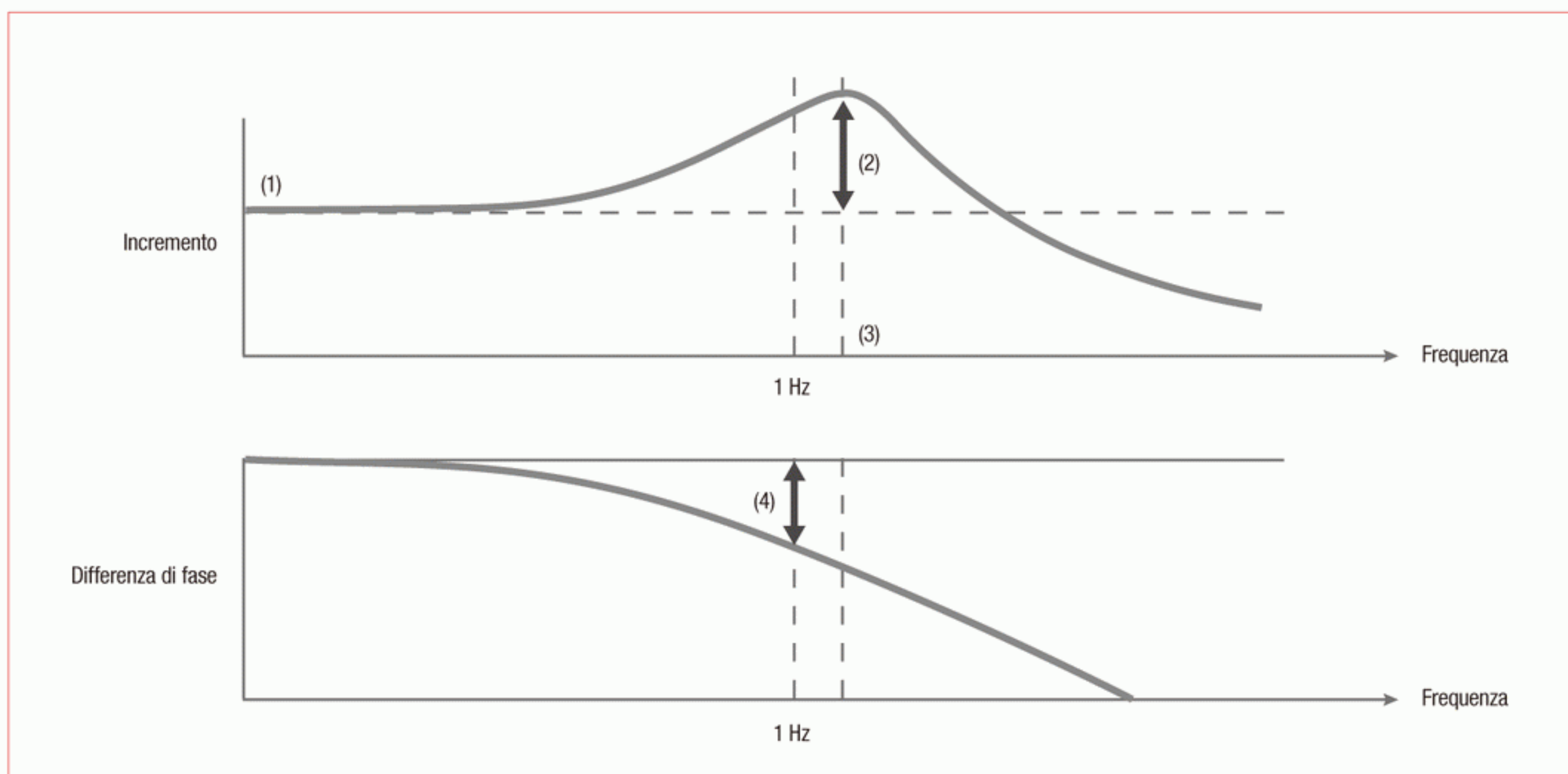
Nell'ultima sezione abbiamo spiegato che il movimento del veicolo è da considerarsi un fenomeno oscillatorio. Qui vedremo come le caratteristiche di sterzata influenzano le caratteristiche generali del veicolo, studiandone la risposta in riferimento alla teoria dell'oscillazione. Osserveremo come un'auto che viaggia a velocità costante risponde al movimento periodico dello sterzo, consistente nel ruotare il volante per poi riportarlo in posizione retta (marcia rettilinea). Ai fini dell'osservazione muteremo anche la velocità di sterzata (frequenza di sterzata).

Ricordati il diagramma di Bode spiegato nella sezione 1-6. La figura 2-4-1 è un diagramma di Bode che illustra la frequenza di risposta del rateo di imbardata al movimento periodico dello sterzo. Quando la frequenza di sterzata è molto bassa (quando il volante viene ruotato molto lentamente), l'incremento (rapporto d'ampiezza) ricorda sostanzialmente il rateo d'imbardata del sovrasterzo, dello sterzo naturale e del sottosterzo in condizione di guida circolare fissa. Quando la frequenza di sterzata aumenta, il rapporto d'ampiezza per le auto con sottosterzo aumenterà, con picco a una determinata frequenza, con incremento maggiore. Per auto neutre e con sovrasterzo non esiste un picco e l'incremento (rapporto d'ampiezza) continua a ridursi con l'aumento della frequenza di sterzata.

Osservando il grafico della linea di fase, il ritardo nella fase cresce con l'aumento della frequenza di sterzata con tutti i tipi di caratteristiche di sterzata. Il ritardo della fase è però minimo in auto sottosterzanti. Questo significa che un'auto con caratteristiche di sottosterzo ha la risposta più pronta ai movimenti dello sterzo.

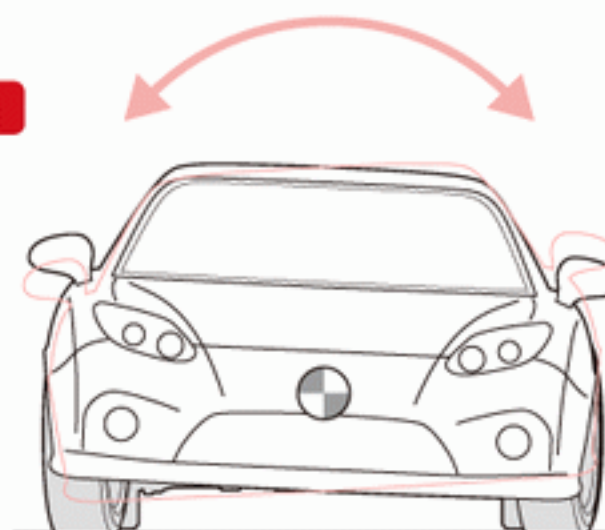
Figura 2-4-1 **Diagramma schematico che mostra la risposta della velocità d'imbardata a movimenti periodici dello sterzo per auto con diverse caratteristiche di sterzata**

Quattro punti da considerare in merito al diagramma di Bode

Ora spiegheremo come il diagramma di Bode può essere utilizzato per finalità pratiche. Esistono diversi elementi da tenere in considerazione in un diagramma di Bode. Osserva la risposta di frequenza della velocità d'imbardata: come prima cosa, occorre notare l'incremento a frequenza molto bassa (vedi (1) nella figura 2-4-2). Questo valore, sostanzialmente, corrisponde al valore in guida circolare stazionaria. Il secondo punto da considerare è l'altezza del picco di incremento (vedi (2) nella figura 2-4-2). Le auto con sottosterzo marcato hanno una risonanza maggiore, per via della riduzione nello smorzamento dell'imbardata, cosa che aumenta l'altezza del picco di incremento. Su auto con sovrasterzo o con sterzo neutro non esistono invece picchi di incremento. Per ottenere le caratteristiche di sterzata ottimali, bisogna puntare a ottenere un picco di risonanza moderato. Il terzo punto è la frequenza di risonanza (vedi (3) nella figura 2-4-2). Più alta è la frequenza di risonanza, più rapida è la risposta, cosa che permette al guidatore di ottenere un feedback immediato dal volante. Il quarto punto è il ritardo di fase (vedi (4) nella figura 2-4-2). Se il ritardo di fase è elevato, la velocità d'imbardata viene generata più lentamente. Per questo è fondamentale ridurre al minimo tale ritardo, per ottenere una risposta dello sterzo immediata.

Figura 2-4-2 Quattro punti da considerare in merito al diagramma di Bode

2-5 Rollio del corpo vettura e movimento del veicolo

▶ Utilizzare il rollio del corpo vettura per regolare le caratteristiche di sterzata

Il corpo della vettura è soggetto a rollio verso l'esterno mentre percorre una curva. Fino a questo momento abbiamo intenzionalmente omesso gli effetti di tale rollio per semplificare la discussione: il movimento del veicolo, in realtà, viene notevolmente influenzato dal rollio del corpo vettura. Ora spiegheremo gli effetti del rollio del corpo vettura in rapporto alle prestazioni generali dell'auto.

Figura 2-5-1

Effetti del rollio del corpo vettura sulle caratteristiche di sterzata

Nella figura 2-5-2 si può osservare come, anche se il carico dovesse raddoppiare, la forza angolare non sarebbe direttamente proporzionale. Questo perché si ha un ritorno calante con il crescere della forza angolare, che va a tracciare una curva di saturazione su un grafico. Quando un'auto curva, il trasferimento del peso si verifica dalla ruota interna a quella esterna. La somma della forza angolare delle ruote interne ed esterne risulta minore, quando viene considerato il trasferimento del peso, in rapporto alla somma senza trasferimento del peso. In altre parole, più è importante il trasferimento del peso, più piccole risultano le quantità di forza angolare.

Figura 2-5-2 **Rapporto fra carico della gomma e potenza angolare. Carico e potenza angolare non sono legati proporzionalmente: anche se il carico dovesse raddoppiare, la potenza angolare non lo farebbe.**

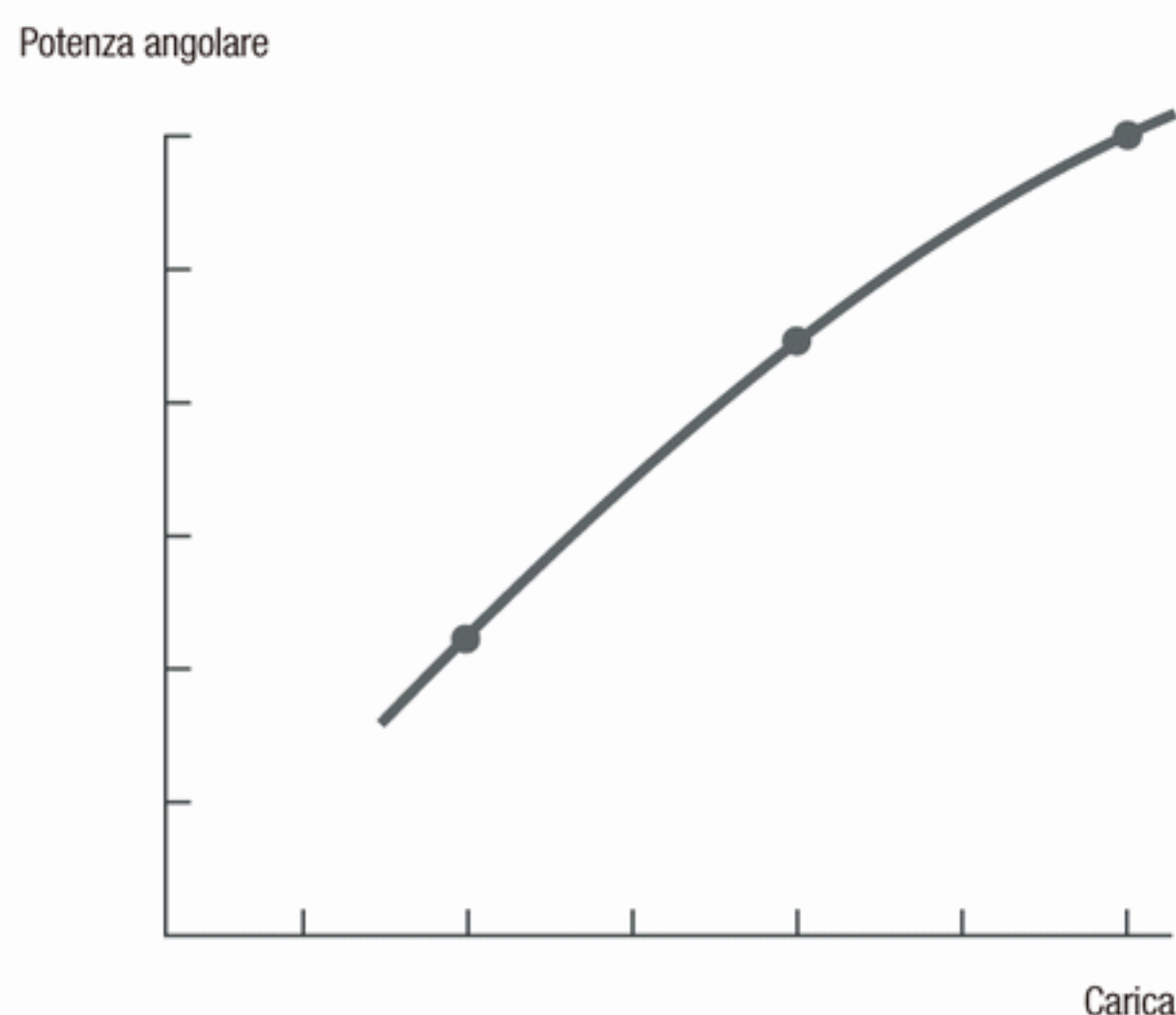
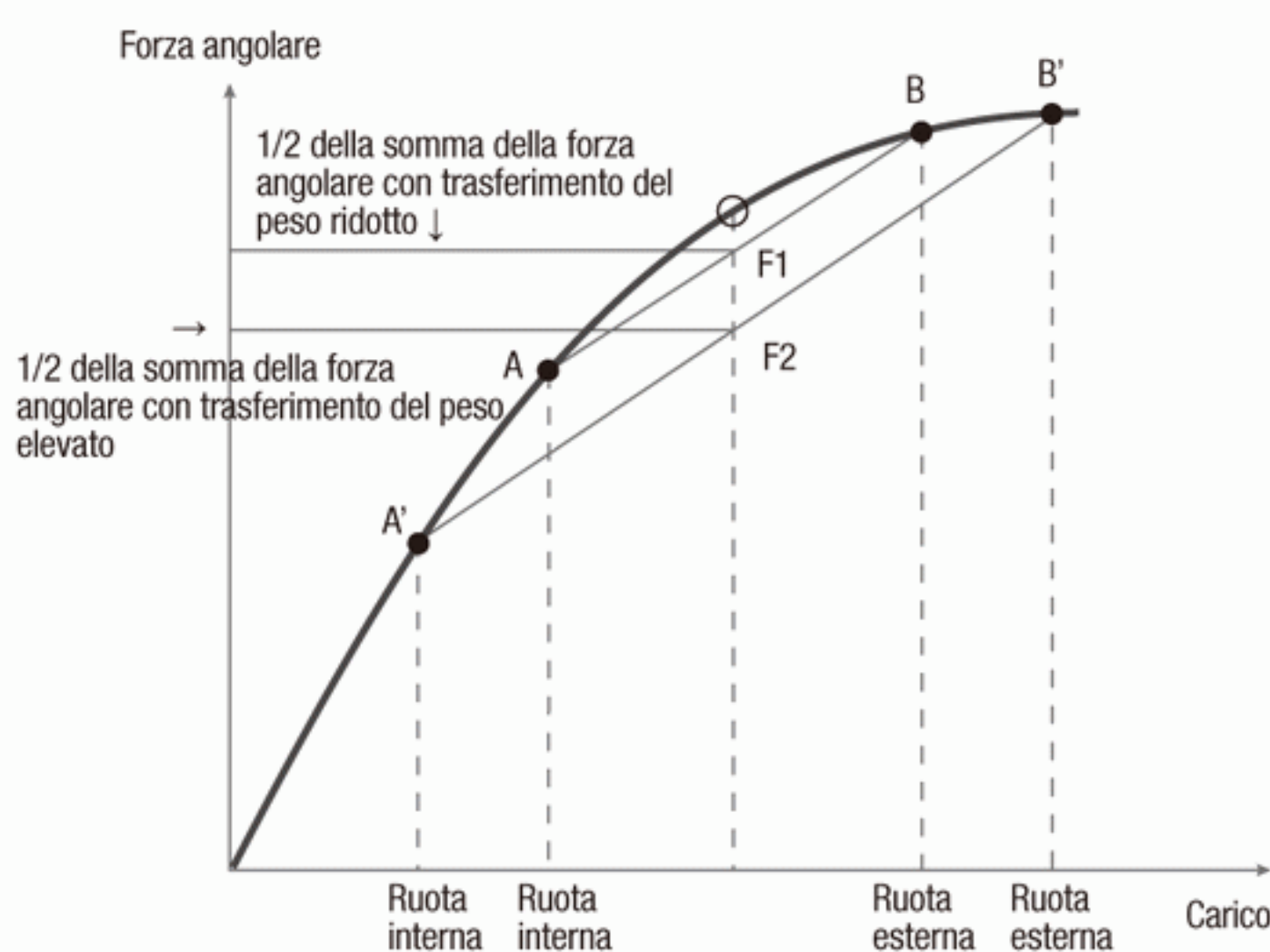



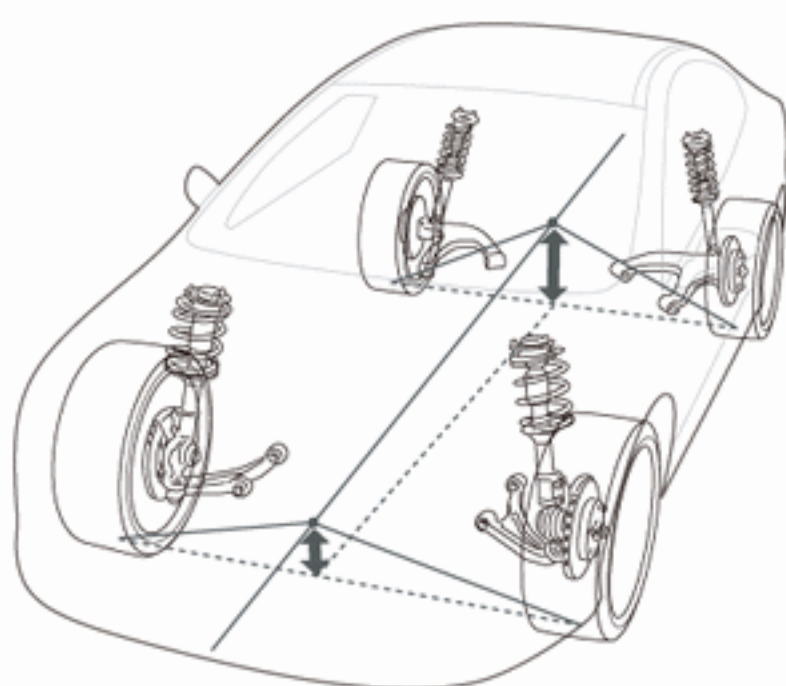
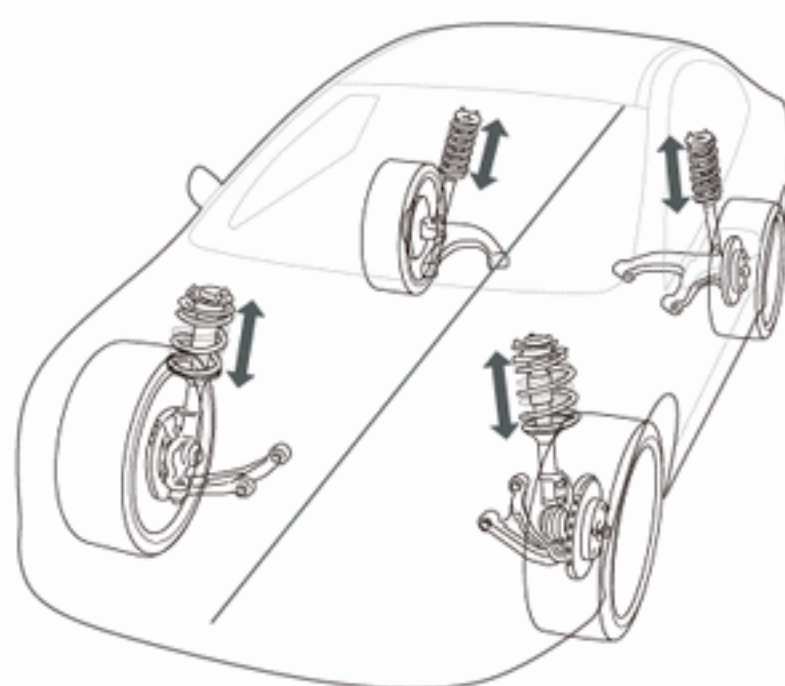
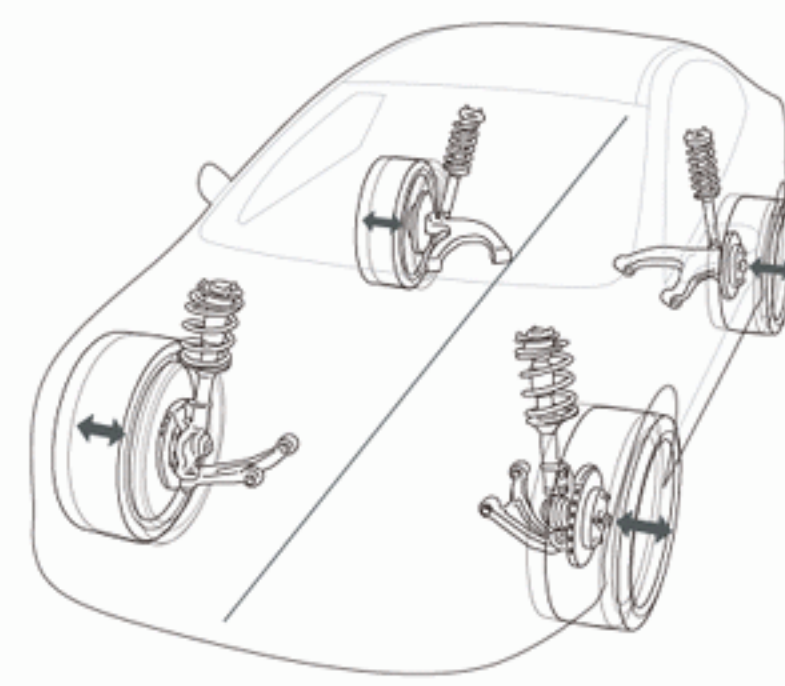
Figura 2-5-3 **Confronto fra un'auto con trasferimento del peso elevato e una vettura con trasferimento del peso ridotto. Sulla seconda, la forza angolare F1 è 1/2 della somma di ruota interna A e ruota esterna B. Su un'auto con maggior trasferimento del peso, la forza angolare F2 è 1/2 della somma di A e B. Un'auto con minor trasferimento del peso ha una forza angolare totale superiore.**

Caratteristiche di sterzata con trasferimento del peso diverso fra anteriore e posteriore

L'azione della forza angolare delle gomme cambia in rapporto al carico verticale, fino alla saturazione. Pertanto, se il peso trasferito dal rollio del corpo della vettura è diverso fra le ruote anteriori e quelle posteriori, le caratteristiche di sterzata variano. Se il trasferimento del peso sulle ruote anteriori è maggiore di quello sulle ruote posteriori, si ha il sottosterzo. Se il trasferimento del peso sulle ruote anteriori è minore di quello sulle ruote posteriori, si verifica il sovrasterzo.

L'ammontare di peso trasferito fra destra e sinistra viene definito dall'equilibrio fra "l'effetto della forza esterna collegata al rollio del corpo vettura" e "l'effetto della reazione di rigidità al rollio dell'auto". Questo rapporto viene determinato principalmente da altezza centrale di rollio anteriore e posteriore, rapporto di rigidità al rollio e carreggiata. Senza addentrarci eccessivamente in dettagli, l'altezza centrale di rollio è relativa al momento generato dalla forza laterale della ruota, la rigidità al rollio è collegata alla distribuzione anteriore e posteriore del momento della forza esterna, mentre la carreggiata è collegata al momento generato dal trasferimento di peso. L'ammontare di peso trasferito dipende da questi rapporti e aiuta a comprendere al meglio gli effetti del rollio del corpo vettura sulle caratteristiche di sterzata, come indicato nella figura 2-5-1.

Grafico 2-5-1 Modifiche nelle caratteristiche di sterzata e messa a punto delle sospensioni

	Sottosterzo	Sovrasterzo
Centro di rollio - ruota anteriore	Elevata	Ridotta
Centro di rollio - ruota posteriore	Ridotta	Elevata
Rapporto rigidità al rollio	Elevato	Ridotto
Battistrada - anteriore	Ridotto	Elevato
Battistrada - posteriore	Elevato	Ridotto

Figura 2-5-4

Il sottosterzo aumenterà incrementando l'altezza centrale di rollio delle ruote anteriori, oppure riducendo quella delle ruote posteriori

Il sovrasterzo aumenterà incrementando il rapporto di rigidità al rollio delle gomme anteriori

Il sottosterzo aumenterà riducendo la carreggiata delle ruote anteriori, oppure incrementando quella delle ruote posteriori

2-6 Oscillazione in una massa sospesa e una massa non sospesa

▶ Una teoria da non ignorare nella messa a punto delle sospensioni

L'oscillazione verticale ha un effetto diretto sul comfort di marcia di una vettura e sulla tenuta di strada delle gomme. Vibrazioni marcate possono rendere la marcia non sopportabile, arrivando a disturbare la tenuta delle gomme fino al punto di causare una perdita di trazione. Per evitarlo, è necessario mettere a punto con cura molle e ammortizzatori delle sospensioni. Questa sezione ti introdurrà ai concetti di base delle oscillazioni verticali, necessari per mettere a punto correttamente le sospensioni.

Modalità di oscillazione

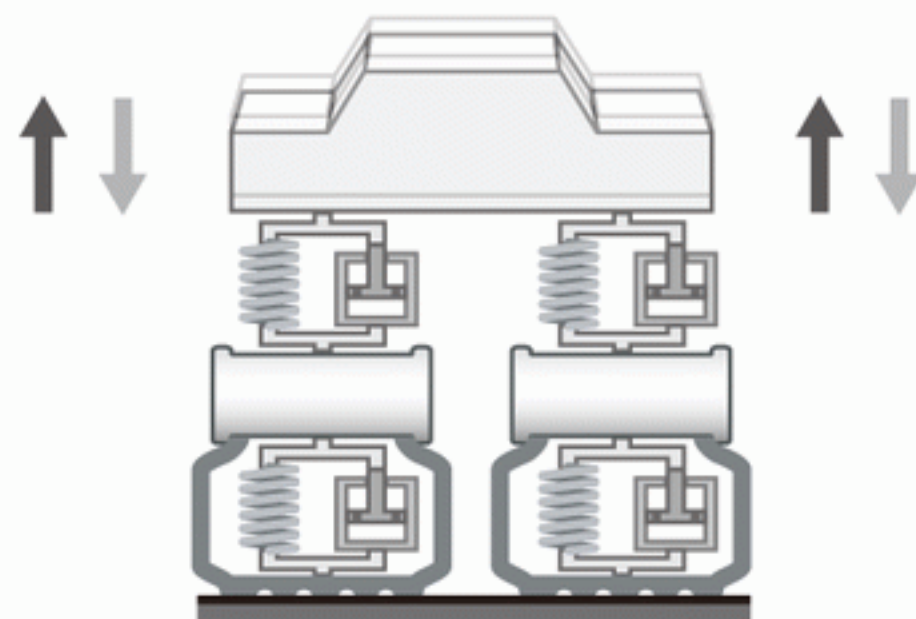
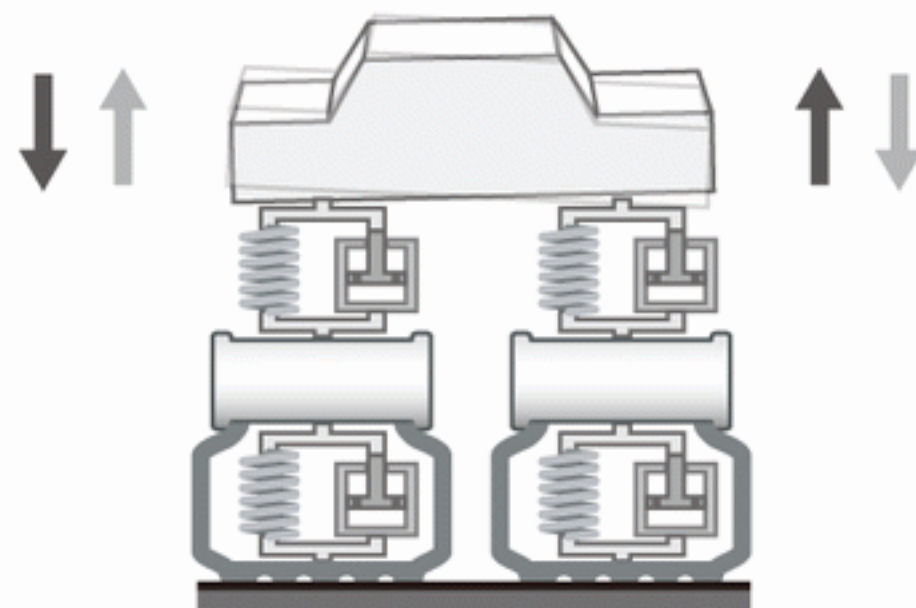
Con l'espressione massa sospesa si fa riferimento alla massa totale sostenuta dalle sospensioni, mentre la massa non sospesa è la massa totale situata fra le sospensioni e le gomme. Qui ci concentreremo sulle oscillazioni di rimbalzo e di beccheggio della massa sospesa, come pure sull'oscillazione verticale della massa non sospesa.

La figura 2-6-1 è un'illustrazione semplificata dell'oscillazione con le ruote anteriori e posteriori che supportano l'intera vettura. In questo modello, la direzione di spostamento della massa sospesa è verso l'alto o verso il basso (due direzioni in totale), come per la massa non sospesa. Per questo motivo vi sono quattro direzioni di spostamento, quattro gradi di libertà e quattro frequenze naturali. La risonanza primaria è la risonanza di rimbalzo, vale a dire l'oscillazione che si verifica nella massa sospesa anteriore e posteriore (anteriore e posteriore si estendono e si comprimono simultaneamente). L'oscillazione secondaria è quella di beccheggio, nella quale le masse sospese anteriore e posteriore oscillano in direzioni opposte (quando l'anteriore si estende il posteriore si contrae, e viceversa). Le risonanze terziaria e quaternaria si verificano nella massa non sospesa.

Figura 2-6-1 **Modello oscillatorio semplificato, con il corpo vettura sostenuto dalle ruote anteriori e posteriori. Sono presenti quattro direzioni di spostamento.**

Carrozzeria
Sospensioni
Massa non sospesa
Gomma
Ruota anteriore
Ruota posteriore

Figura 2-6-2 **Modalità di oscillazione**

Risonanza primaria: Modalità rimbalzo. Le sospensioni anteriori e posteriori si estendono e si contraggono simultaneamente per far rimbalzare il corpo vettura.

Risonanza secondaria: Modalità beccheggio. Le sospensioni anteriori e posteriori si estendono e si contraggono in direzioni opposte, generando movimenti di rollio nel corpo vettura.

Risonanza terziaria e risonanza quaternaria: Modalità di risonanza della massa non sospesa

Messa a punto delle sospensioni ed effetti sulla modalità di oscillazione

La vibrazione del corpo vettura ha un effetto negativo sulla tenuta di strada delle gomme e sul comfort di marcia, pertanto deve essere ridotta il più possibile. L'oscillazione della massa sospesa influisce anche sulle prestazioni aerodinamiche, specialmente nelle auto da competizione.

Occorre notare che le oscillazioni delle masse sospese e quelle delle masse non sospese hanno le seguenti caratteristiche. Le nozioni acquisite saranno utili nella messa a punto delle sospensioni.

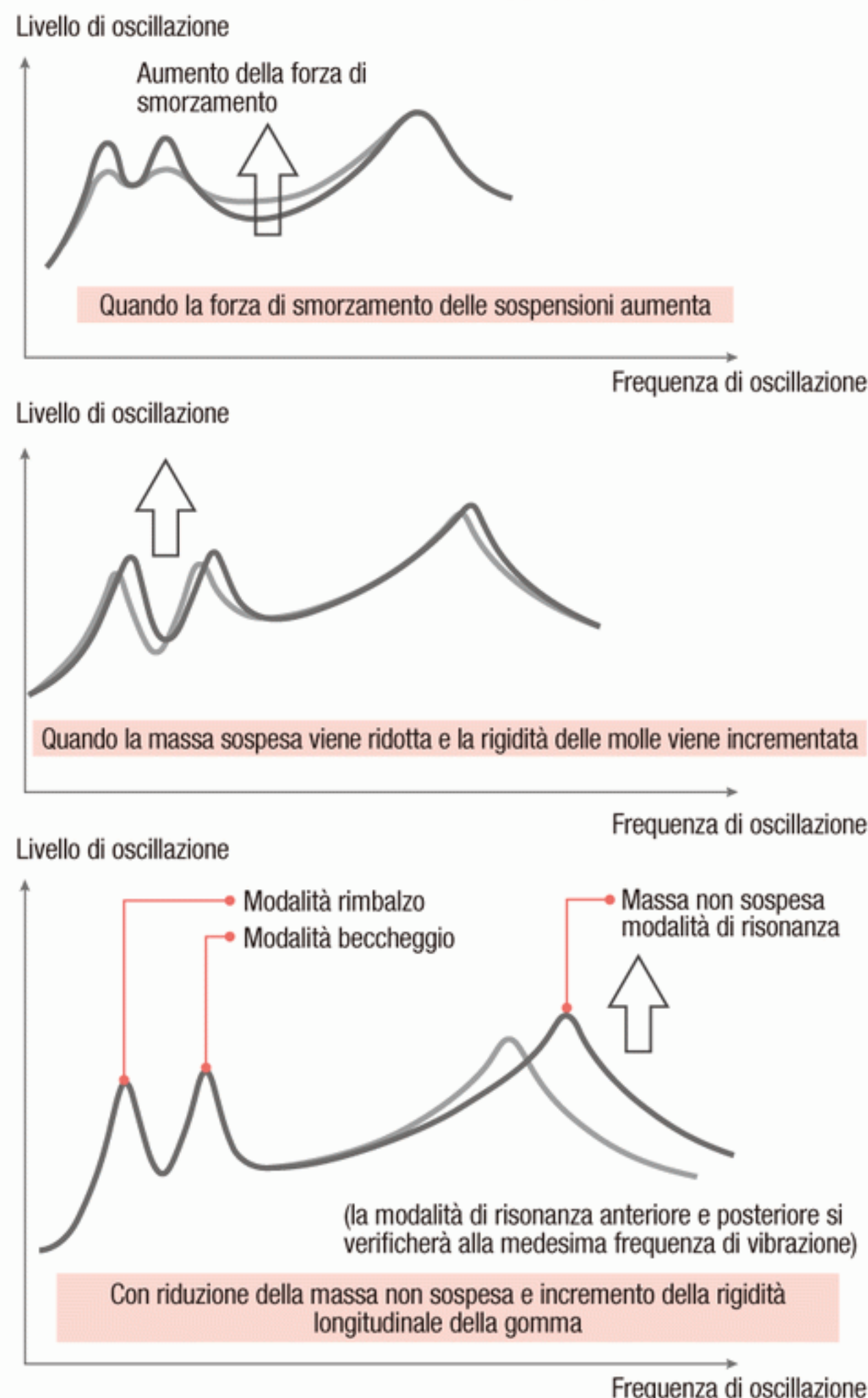
1) **Aumentando la forza di smorzamento, faciliterai la riduzione delle oscillazioni delle masse sospese a frequenze vicine a quella di risonanza. Questo, però, andrà ad aumentare l'oscillazione in altre aree. (Vedi la figura 2-6-3, grafico in alto)**
2) **Aumentando la forza di smorzamento, si va anche a incrementare la frequenza di risonanza della massa sospesa. (Vedi la figura 2-6-3, grafico in alto)**
3) **Modificando la massa sospesa o la rigidità delle molle, si influenza la risonanza della massa sospesa, mentre l'influenza sulla risonanza della massa non sospesa è limitata. (Vedi la figura 2-6-3, grafico centrale)**
4) **Modificando la massa non sospesa o la rigidità longitudinale delle gomme, si influenza la risonanza della massa non sospesa, mentre l'influenza sull'oscillazione sospesa è limitata. (Vedi la figura 2-6-3, grafico inferiore)**

Figura 2-6-3

Influenza dell'algoritmo della sospensione sull'oscillazione verticale

Quando la forza di smorzamento delle sospensioni aumenta

Quando la massa sospesa viene ridotta e la rigidità delle molle viene incrementata

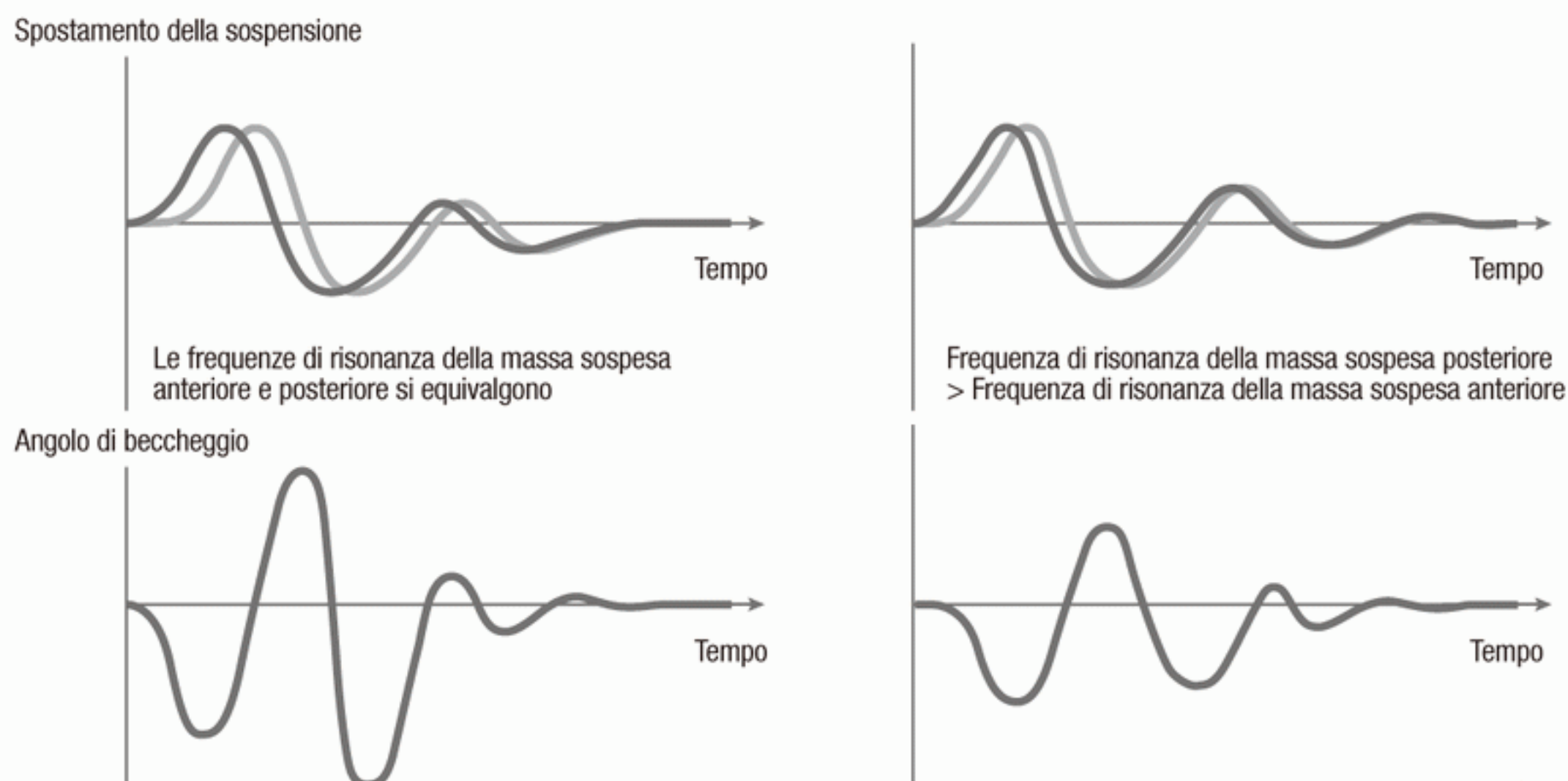
Con riduzione della massa non sospesa e incremento della rigidità longitudinale della gomma

Controllo del beccheggio

Quando un'auto procede in linea retta, gli input della superficie stradale alle ruote posteriori risultano ritardati del tempo derivato da passo e velocità del veicolo. Impostando la frequenza di risonanza delle masse sospese delle ruote posteriori in modo che sia leggermente superiore a quella delle ruote anteriori, la vibrazione delle ruote posteriori recupera e si allinea a quella delle ruote anteriori, aiutando così a ridurre al minimo il beccheggio.

Figura 2-6-4

Controllo del movimento di beccheggio. Il beccheggio può essere minimizzato aumentando la frequenza di risonanza della massa sospesa posteriore.

Le frequenze di risonanza della massa sospesa anteriore e posteriore si equivalgono

Frequenza di risonanza della massa sospesa posteriore > Frequenza di risonanza della massa sospesa anteriore

2-7 Cosa rende un'auto capace di prestazioni elevate?

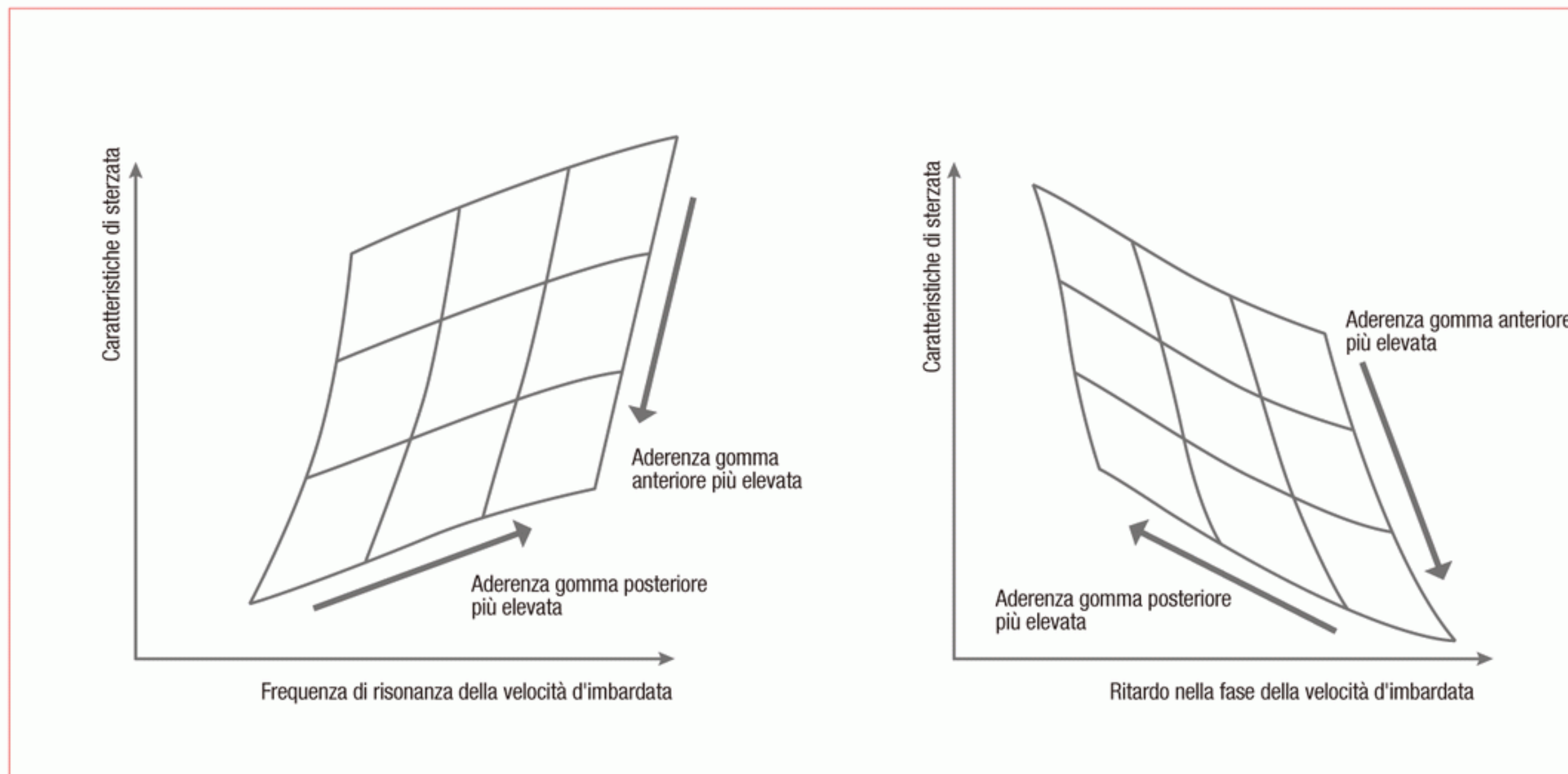
▶ Le prestazioni del veicolo dipendono dalle ruote posteriori

Frequenza di risonanza della velocità d'imbardata e caratteristiche di sterzata

In generale, se la frequenza di risonanza della velocità d'imbardata è elevata, l'auto dovrebbe rispondere rapidamente, ottenendo così prestazioni elevate. La frequenza di risonanza della velocità d'imbardata si può incrementare migliorando la forza angolare delle gomme posteriori, oppure alleggerendo la vettura.

La figura 2-7-1 illustra come l'aderenza delle ruote anteriori e posteriori influenza le prestazioni complessive del veicolo. Osservandola, puoi notare come aumentando l'aderenza delle gomme posteriori si incrementano il sottosterzo e la frequenza di risonanza della velocità d'imbardata. Viceversa, aumentando l'aderenza delle ruote anteriori, si fa calare la frequenza di risonanza della velocità d'imbardata, cosa che incrementa il sovrasterzo. Per contro, l'aumento dell'aderenza delle ruote posteriori ridurrà il ritardo nella fase, mentre l'aumento sulle ruote anteriori lo incrementerà.

Come spiegato prima, il livello d'aderenza delle gomme posteriori ha un effetto notevole sulle prestazioni generali di una vettura. Quando modifichi il sistema delle sospensioni, devi fare in modo che sia garantito un livello di aderenza posteriore adeguato. Quindi si può passare all'equilibratura del livello di aderenza fra le ruote anteriori e posteriori. Questa procedura va compresa a fondo, in quanto rappresenta la base per il miglioramento delle prestazioni del veicolo.

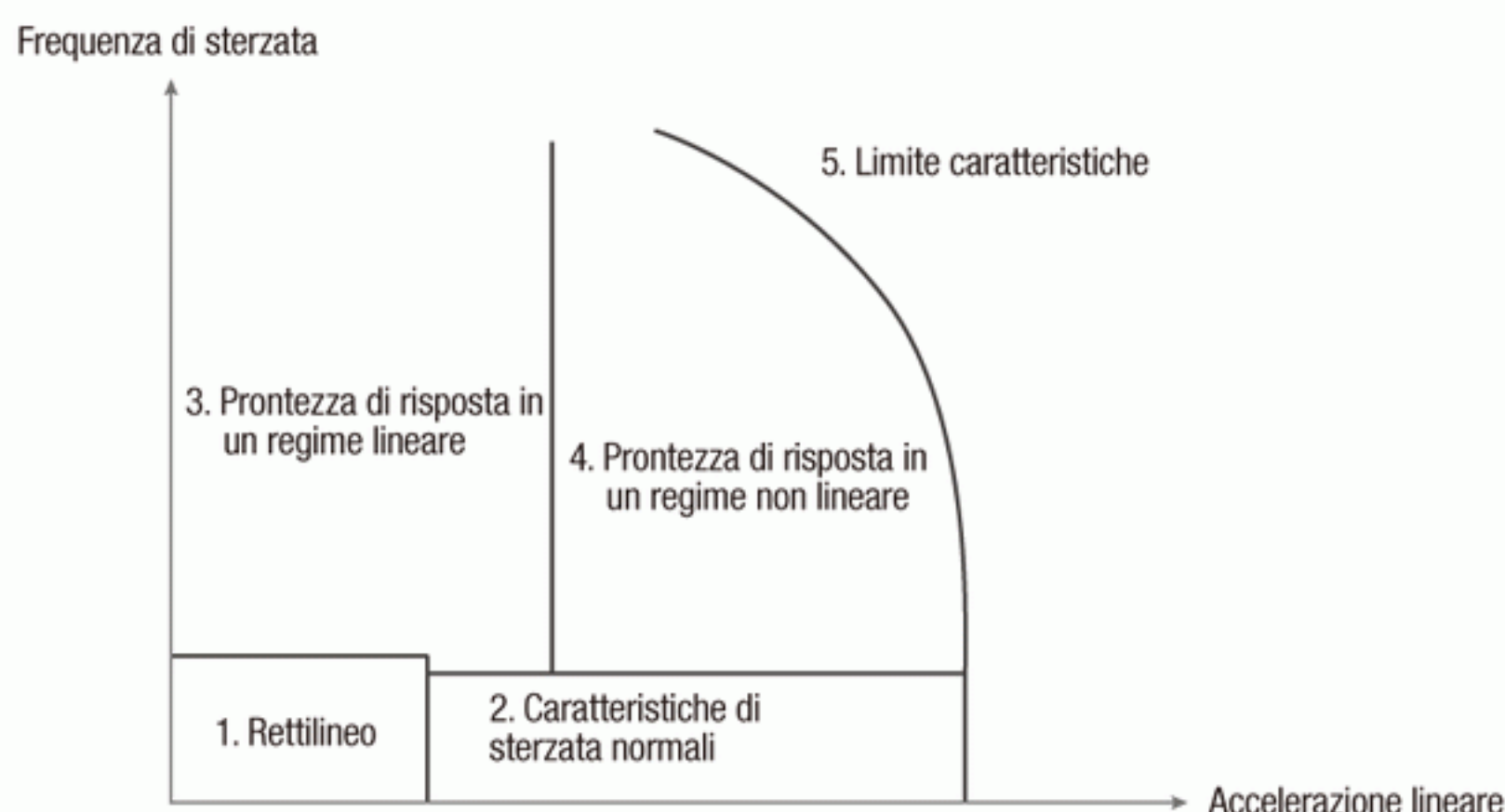
Figura 2-7-1 Correlazione fra aderenza delle gomme, risposta dello sterzo e caratteristiche di sterzata

SUGGERIMENTI Se il momento d'inerzia dell'imbardata del veicolo può essere espresso come $I=mK^2$, il raggio inerziale d'imbardata è esprimibile come $K=\sqrt{I/M}$, dove "I" rappresenta il momento d'inerzia dell'imbardata e "m" la massa del veicolo.

Categorizzare la prontezza di risposta della vettura

Si può discutere a lungo del concetto di prontezza di risposta delle vetture, ma dato che il movimento del veicolo può essere inserito in un'equazione del moto (come spiegato in 1-1), risulta possibile organizzare questo soggetto in modo logico. Detto questo, si possono utilizzare accelerazione laterale e frequenza di sterzata per categorizzare le caratteristiche del movimento di un veicolo, come mostrato nella figura 2-7-2.

Finora abbiamo incentrato la nostra analisi della prontezza della risposta sulle (2) caratteristiche di sterzata normali in un (3) regime lineare. Con quest'ultima espressione facciamo riferimento all'ipotetica comprensione di una situazione nella quale la potenza angolare è stabile, a prescindere dalla situazione di spostamento. D'altro canto, la prontezza della risposta di un (4) regime non lineare si misura in base a un intervallo nel quale la forza angolare arriva alla saturazione. Per le auto da corsa questo regime è di particolare importanza. Anche considerando un regime non lineare, però, si applicano le medesime caratteristiche di base di un regime lineare. Così, comprendendo il rapporto fra forza angolare e momento delle ruote anteriori e posteriori, il tutto si può applicare con una procedura simile a quella attuabile con regime lineare. Inoltre, è meglio posizionare il (5) limite di campo delle caratteristiche il più lontano possibile dal punto iniziale.

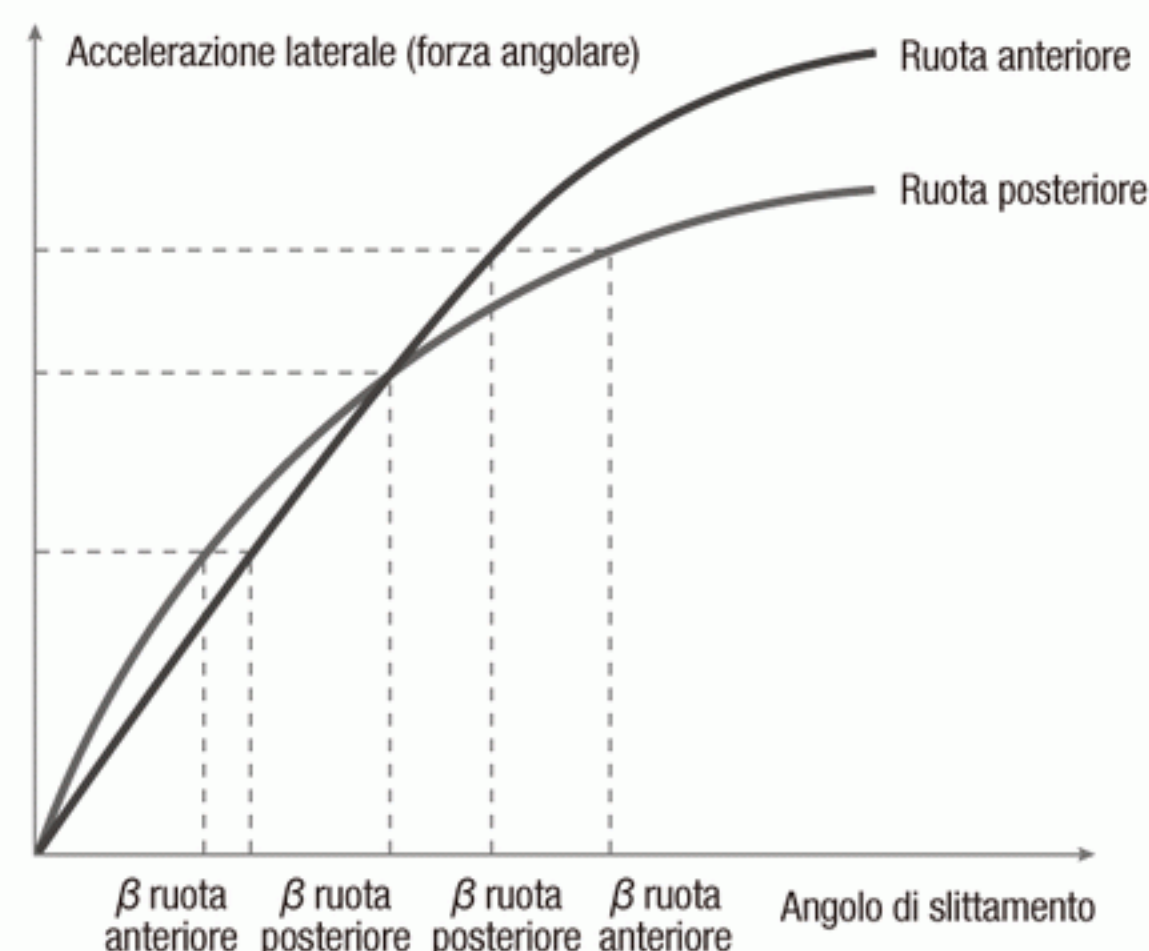
Figura 2-7-2 Categoria delle caratteristiche di movimento della vettura

Frequenza di sterzata
5. Limite caratteristiche
3. Prontezza di risposta in un regime lineare
4. Prontezza di risposta in un regime non lineare
1. Rettilineo
2. Caratteristiche di sterzata normali
Accelerazione lineare

SUGGERIMENTI

Un esempio standard di movimento della vettura in un regime non lineare è quello che viene definito sterzata inversa. Abbiamo già spiegato in 1-2 che è possibile determinare le caratteristiche di sterzata in base all'entità dell'angolo di slittamento rispetto alla normale traiettoria di svolta del veicolo. Questa volta esamineremo la sterzata inversa, utilizzando una vettura con le caratteristiche mostrate nella figura 2-7-3.

Quando delle vetture con caratteristiche simili eseguono delle svolte normali e l'accelerazione laterale è limitata, l'angolo di slittamento della ruota anteriore aumenta e compaiono le caratteristiche del sottosterzo. Quando, però, l'accelerazione laterale cresce, le gomme devono generare una forza sufficientemente intensa per contrastarla, per cui l'angolo di slittamento aumenta e la forza angolare raggiunge l'intervallo di saturazione. Questo comporta un maggior angolo di slittamento delle ruote posteriori, in quanto l'accelerazione laterale aumenta fino a un determinato valore, facendo emergere le caratteristiche di sovrasterzo della vettura e rendendo instabile il movimento. Questa situazione, nella quale le caratteristiche di sterzata si modificano in base all'accelerazione laterale, si definisce sterzata inversa.

Figura 2-7-3

Accelerazione laterale (forza angolare)
Ruota anteriore
Ruota posteriore
β ruota anteriore
β ruota posteriore
β ruota posteriore
β ruota anteriore
Angolo di slittamento

3-1 Temperatura e pressione

▶ Il movimento molecolare genera temperatura e pressione

Oggi sappiamo che calore, temperatura e pressione sono tutti fenomeni generati dal moto molecolare. Questo fatto è venuto alla luce solamente nel 19° secolo ed è stato accettato e dimostrato teoricamente nel corso del 20° secolo. Per comprendere correttamente il rendimento e le dissipazioni di energia dei propulsori e l'aeromeccanica (idromeccanica), argomento di cui parleremo più avanti, è necessario apprendere alcune nozioni sul movimento molecolare relativamente a temperatura e pressione.

Attività molecolare irregolare in uno spazio chiuso

Visualizziamo una materia gassosa all'interno di un contenitore sigillato. Un'osservazione macroscopica di detta materia gassosa indicherebbe che temperatura e pressione sono entrambe stabili. Si avrebbe ciò che si definisce stato di equilibrio. Da una prospettiva microscopica, però, all'interno del contenitore è presente una miriade di molecole di gas, che si muovono tutte in modo irregolare. Una molecola può avere una velocità molto bassa, un'altra può muoversi in modo estremamente rapido. Tali molecole collidono fra loro e con le pareti del contenitore, mutando velocità mentre si spostano.

Figura 3-1-1 Gas all'interno di un contenitore sigillato in stato di equilibrio

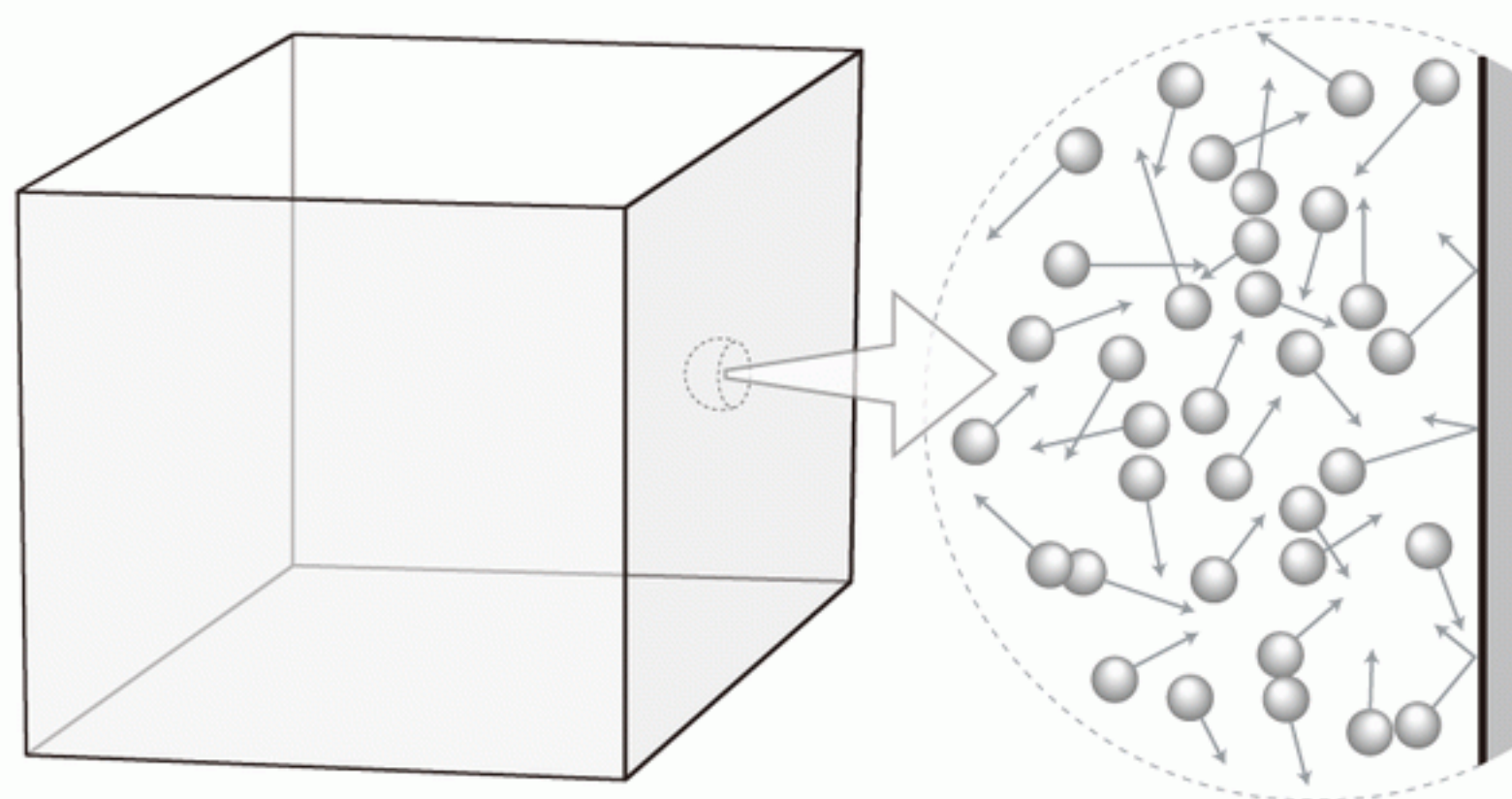



Figura 3-1-2 La costante di Boltzmann collega le grandezze meccaniche a quelle termodinamiche

Grandezze della meccanica — Costante di Boltzmann — Grandezze della termodinamica

La temperatura non è altro che una misura dell'energia cinetica media di ogni molecola

All'interno del contenitore è presente un numero enorme di molecole di gas che si muovono a diverse velocità. Dal punto di vista energetico, le molecole del gas possiedono diversi livelli di energia cinetica. La temperatura non è altro che una misura dell'energia cinetica media di ogni molecola, che si sposta in modo irregolare a velocità diversa. Può essere espressa matematicamente come segue:

Energia cinetica media per molecola = 3/2 kT

T è la temperatura assoluta e "k" è la costante di Boltzmann. Si tratta di una costante di proporzionalità, che non dipende da temperatura, densità, pressione, quantità o tipo del gas. Quest'equazione si ricollega alla misura meccanica dell'energia cinetica e alla misura termica della temperatura: la costante di Boltzmann è ciò che agisce come punto di collegamento fra le grandezze della meccanica e quelle della termodinamica.

La pressione è data dal valore medio della forza generata dalle molecole in movimento

Tornando alla figura 3-1-1, le molecole di gas collidono continuamente con le pareti del contenitore. Alcune molecole si stanno muovendo a velocità elevata, altre possono avere velocità molto più basse. Alcune molecole impattano perpendicolarmente con le pareti, altre con una certa angolazione. Questo significa che la forza d'impatto varia da molecola a molecola.

Quando viene misurata la pressione, però, si va a rilevare soltanto la forza d'impatto media dall'insieme delle molecole che si muovono in maniera irregolare. Occorre comprendere che, in uno stato di equilibrio, la forza d'impatto e la pressione medie sono sempre uguali a prescindere dal punto dove vengono misurate. In altre parole, anche se le molecole si muovono in modo irregolare e con velocità diverse, da una prospettiva macroscopica la forza d'impatto si distribuisce in egual modo in tutte le direzioni.

Figura 3-1-3 La pressione è data dal valore medio della forza generata dalle molecole in movimento

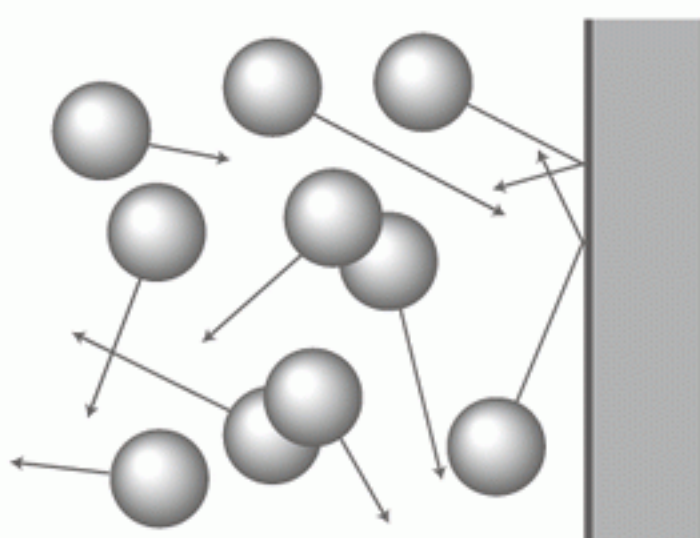
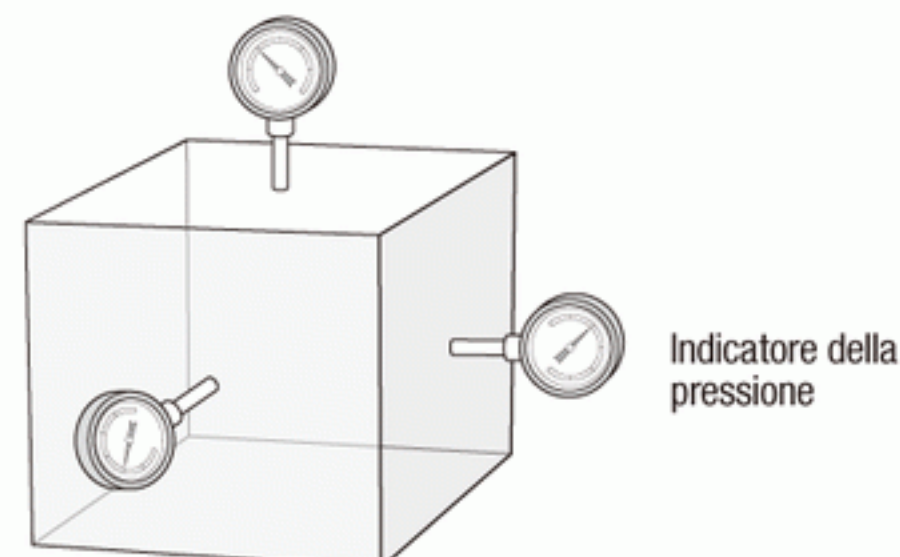



Figura 3-1-4 In uno stato di equilibrio, il valore della pressione è costante in tutte le direzioni

Indicatore della pressione

3-2 Il propulsore caloricamente perfetto

▶ Eliminare il trasferimento termico non necessario: il ciclo di Carnot

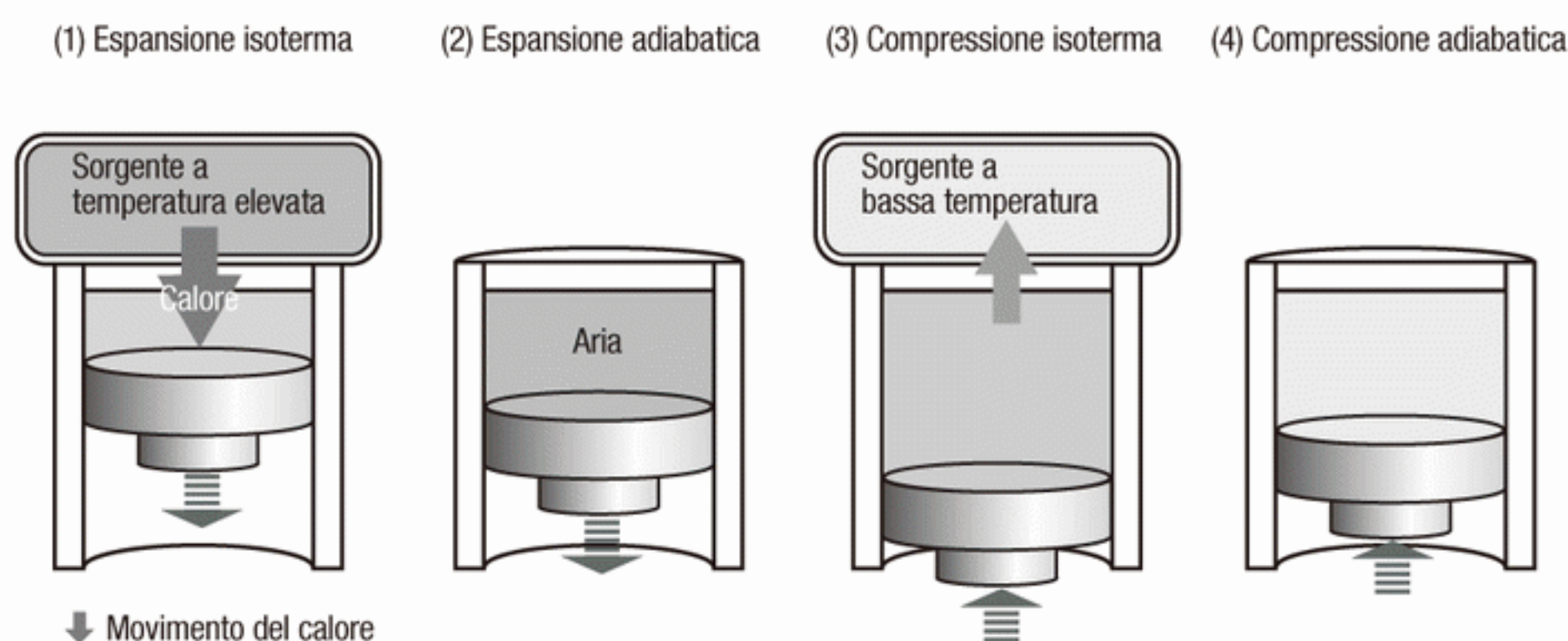
Il motore (propulsore) è una macchina che converte energia termica in un tipo di energia meccanica desiderato. Cosa determina l'efficienza della conversione, quando l'energia termica viene convertita in energia cinetica? La prima persona a dare una risposta a questa domanda è stato l'ingegnere e fisico francese Sadi Carnot. Nel 19° secolo, Carnot riuscì a definire quella che dovrebbe essere il rendimento teorico di un propulsore termico e come questa efficienza può essere determinata tramite procedimenti logici. Le conclusioni raggiunte da Carnot sono divenute un importante punto fermo per lo sviluppo di tutti i propulsori termici.

Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832)

Le due proprietà di Carnot

Quando Carnot iniziò gli studi per la comprensione del propulsore termicamente ideale, concentrò la sua attenzione su due proprietà. Per prima cosa, perché il propulsore termico possa funzionare, era necessario che esistesse una differenza di temperatura. In assenza di tali differenze il trasferimento termico non si sarebbe verificato e, di conseguenza, il propulsore termico non avrebbe potuto funzionare. Però, in presenza di una differenza di temperatura non necessaria all'interno del propulsore termico dopo l'esecuzione del lavoro, si sarebbe verificato un trasferimento termico inefficiente. Per questo Carnot si rese conto che, in relazione al lavoro svolto (energia), sarebbe risultato ideale un propulsore termico non dipendente dal trasferimento termico.

Il secondo elemento sul quale si concentrò riguardava il fatto che, se il volume di un materiale può mutare, il trasferimento termico può avvenire senza modificarne la temperatura. Questo procedimento si definisce trasformazione isoterma. Carnot pensò che, utilizzando la trasformazione isoterma, sarebbe stato possibile creare energia senza generare trasferimenti termici non necessari. Partendo da queste considerazioni preliminari, Carnot teorizzò un innovativo concetto di ciclo termodinamico che non include trasferimenti termici non necessari dovuti a inutili differenze di temperatura.

Figura 3-2-1 Processo del ciclo di Carnot

Ciclo di Carnot

Per osservare con chiarezza la natura del calore, Carnot immaginò un motore ad aria composto da contenitori a temperatura elevata e ridotta, un cilindro chiuso con aria e un pistone. Lasciando che il cilindro entrasse in contatto con i contenitori, egli osservò le proprietà di trasferimento termico fino a ideare un ciclo termodinamico ideale. Il ciclo termodinamico da lui inventato è mostrato nelle figure 3-2-1 e 3-2-2.

1) Lasciando che il cilindro entri in contatto con la sorgente a temperatura più elevata, il calore viene trasferito dalla sorgente al cilindro, andando a espandere l'aria contenuta al suo interno. Ma le differenze di temperatura devono essere evitate, per cui a questo punto la temperatura della sorgente e quella dell'aria nel cilindro dovevano essere mantenute. Inoltre, anche la temperatura dell'aria deve mantenersi stabile. Per ottenere questi risultati, l'aria deve espandersi, lentamente e in modo graduale. L'espansione o la compressione di materia gassosa in base a una temperatura costante e controllata si definisce trasformazione isoterma.

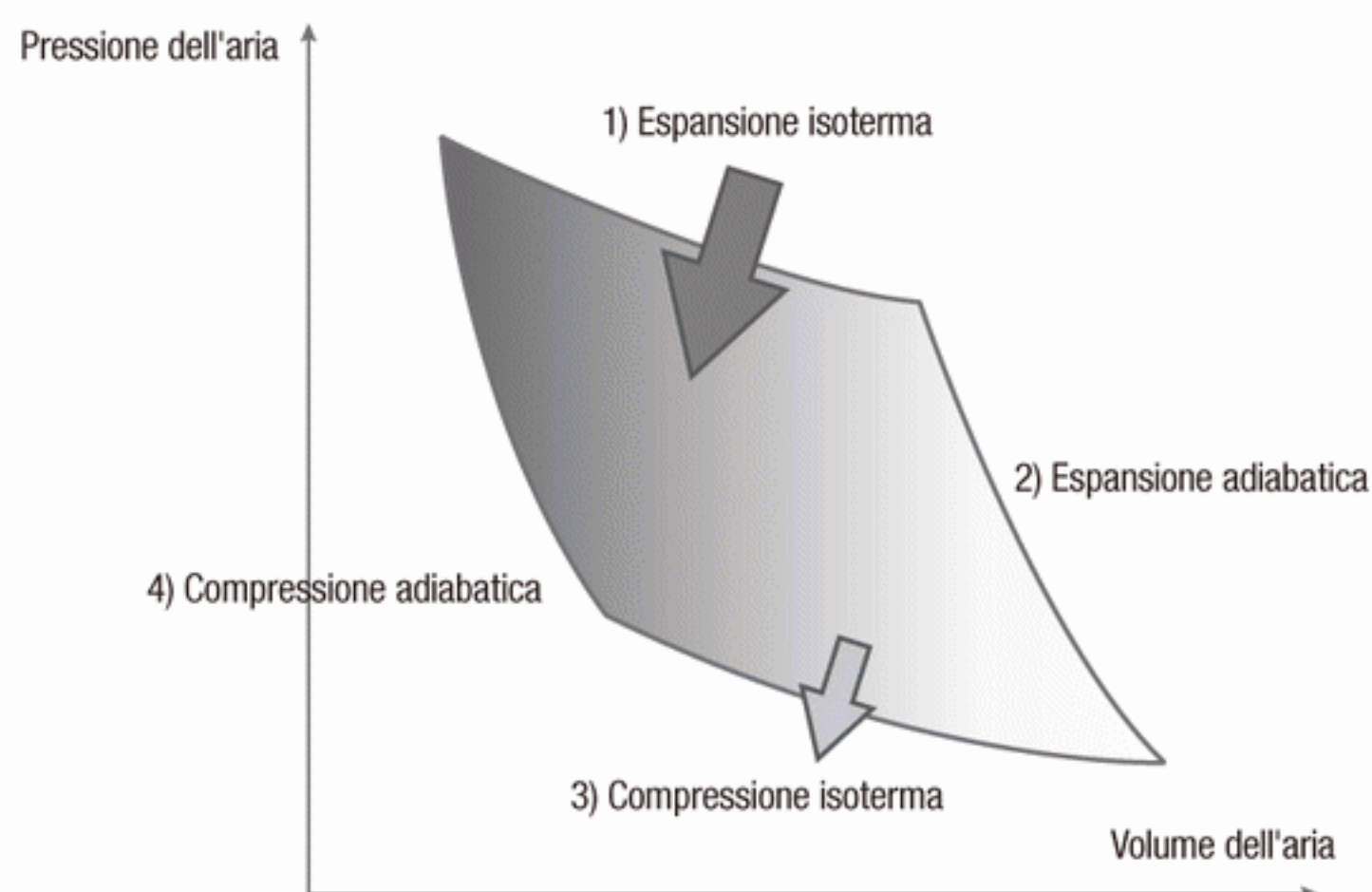
2) Subito dopo, il cilindro espanso entra in contatto con la sorgente a bassa temperatura. Così facendo, però, si genererebbe una differenza di temperatura: per evitarlo, Carnot applicò una trasformazione adiabatica, nella quale la compressione aumenta la temperatura e l'espansione la riduce. Carnot comprese che l'aria espansa dalla sorgente a temperatura elevata poteva esserlo ulteriormente applicando una trasformazione adiabatica, riducendo così la sua temperatura senza alcun trasferimento termico. Occorre tenere presente che questo procedimento richiede comunque un movimento del pistone, per quanto estremamente lento.

3) Quando la temperatura dell'aria all'interno è scesa al livello di quella della sorgente a bassa temperatura, il cilindro entra in contatto con la sorgente, trasferendo così il calore dell'aria alla sorgente mentre comprime l'aria. Anche in questo caso è necessario evitare la differenza di temperatura, per cui il calore viene trasferito lentamente e gradualmente, tramite una trasformazione isoterma.

4) Dopo la trasformazione isoterma, l'aria viene compressa applicando una trasformazione adiabatica per aumentarne la temperatura. Quando, grazie alla compressione, la temperatura dell'aria raggiunge quella della sorgente a temperatura elevata, il processo può tornare alla fase di espansione isoterma descritta al punto (1) per ripetere il ciclo.

Come evidenziato in precedenza, dopo aver eseguito il ciclo attraverso (1) l'espansione isoterma dal contenitore a temperatura elevata, (2) il raffreddamento tramite espansione adiabatica, (3) la compressione isoterma dal contenitore a bassa temperatura e (4) il riscaldamento tramite compressione adiabatica, l'aria nel cilindro torna alla sua condizione originaria, convertendo il calore in energia senza la presenza di trasferimenti termici non necessari. Questo ciclo termodinamico ha preso il nome del suo ideatore ed è noto come ciclo di Carnot.

Cinquant'anni dopo la morte di Carnot, nacque il primo veicolo con motore a benzina. Qui compare una vettura a 3 ruote realizzata da Karl Benz.

Figura 3-2-2 Mutamenti in pressione e volume dell'aria nel ciclo di Carnot

3-3 La conclusione di Carnot

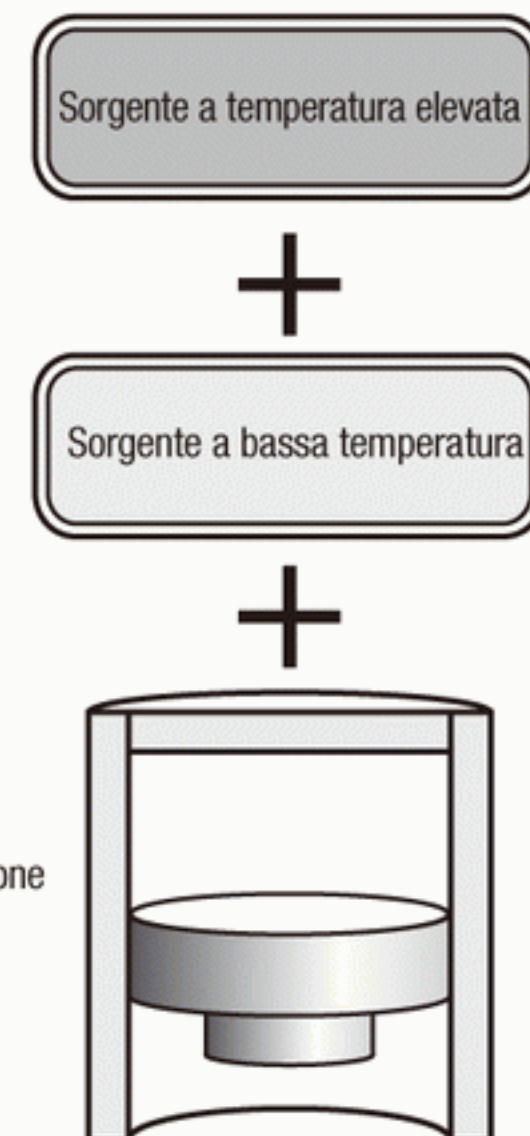
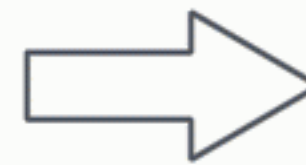
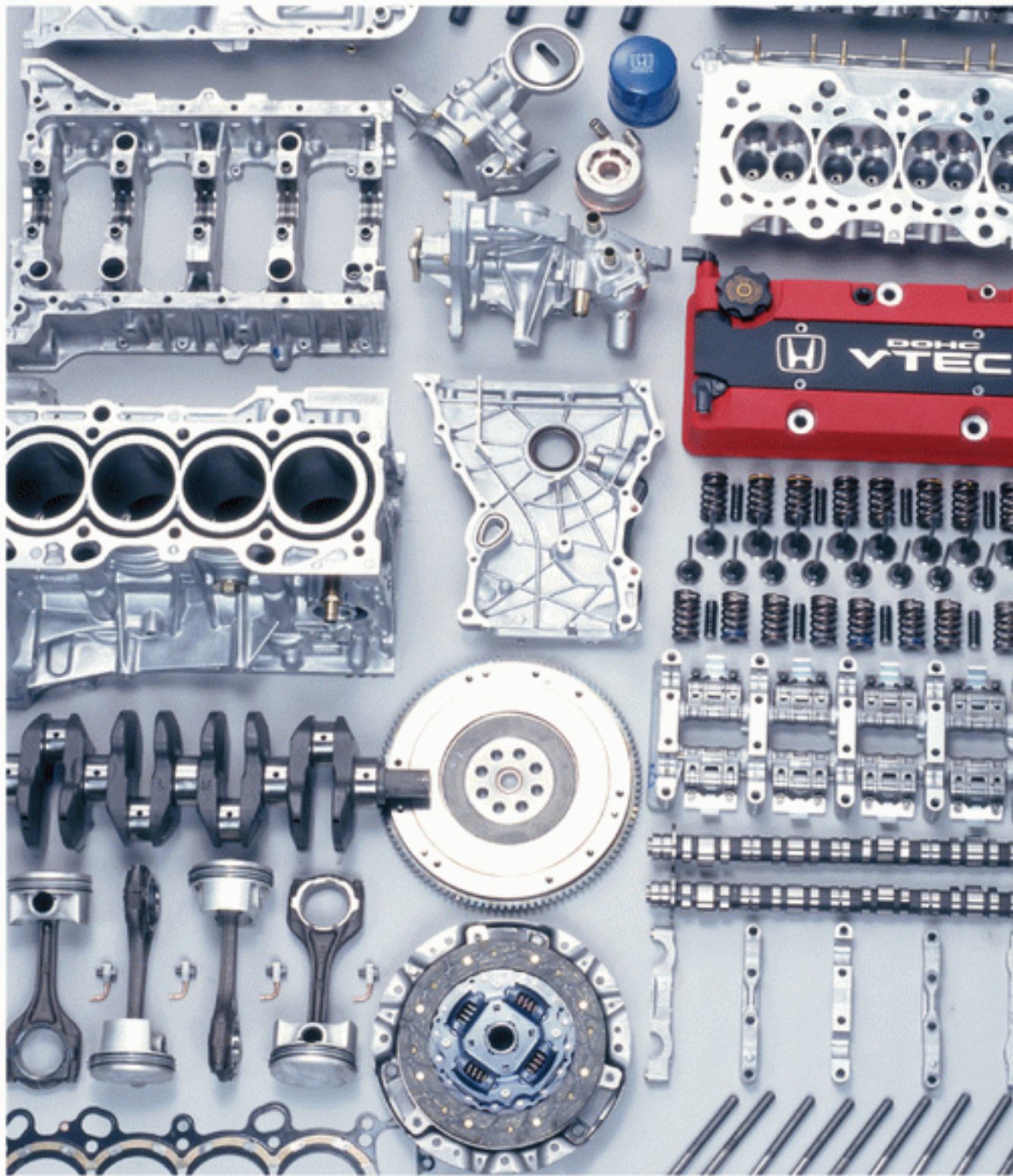
▶ La sorprendente astrazione del propulsore termico

Il rendimento è determinato soltanto dalle temperature delle due sorgenti

Al giorno d'oggi, è normale credere che il ciclo di Carnot sia il ciclo termodinamico più efficiente da utilizzare in un propulsore termico. Carnot fu però capace di utilizzare la pura logica per giungere alla conclusione che, con il ciclo di Carnot, due temperature diverse non sarebbero venute a contatto fra loro all'interno di un cilindro, rendendo così il suo ciclo termodinamico coincidente con il propulsore ideale. Ciò che è ancora più sorprendente è che Carnot concluse che il rendimento del ciclo termodinamico fosse determinato esclusivamente dalle temperature dei bagni termici, elevata e bassa. Carnot non giunse a enunciare questo aspetto con una formula ma, negli anni seguenti, l'ingegnere britannico William Thompson elaborò la seguente espressione matematica.

Temperatura della sorgente a bassa temperatura
Rendimento teorico del ciclo di Carnot

$$= 1 - \frac{\text{Temp. cont. bassa}}{\text{Temp. cont. elev.}}$$

Figura 3-3-1 Il propulsore termico di Carnot identifica precisamente i componenti principali relativi a calore e potenza in un motore termico complesso composto da diversi fattori, riuscendo a realizzare il modello astratto di un propulsore termico.

Nonostante il motore fosse composto da diverse parti, Carnot non si lasciò distrarre da queste considerazioni, ma applicò il ciclo di Carnot al rendimento termico, teorizzando che le temperature elevata e bassa delle sorgenti di calore fossero gli unici fattori da considerare ai fini del rendimento. (L'immagine raffigura un motore benzina V8 Twin Power turbo)

L'astrazione suprema del propulsore termico

Il rapporto fra il rendimento teorico del ciclo di Carnot, con sorgente e temperatura, era stato messo in chiaro. La conclusione alla quale giunse Carnot, inoltre, portò alla luce un aspetto ingegneristicamente molto interessante. Come mostra la formula precedente, il rendimento teorico del ciclo di Carnot è determinato solo dalle differenze di temperatura nelle sorgenti, senza alcuna influenza da parte della struttura del motore, dell'aria, del flusso e di qualunque sostanza derivata. In altre parole, il ciclo di Carnot è determinato esclusivamente da cause naturali e non dal modo in cui un propulsore viene realizzato.

Il propulsore termico di Carnot identifica precisamente i componenti principali relativi a calore e potenza in un motore termico complesso composto da diversi fattori, riuscendo a realizzare il modello astratto di un propulsore termico. Nulla è stato trascurato, tutti gli elementi necessari sono presenti. In un certo modo, si tratta di una forma assoluta di astrazione.

SUGGERIMENTI

Nel 1824, Carnot pubblicò un saggio intitolato "Riflessioni sulla potenza motrice del fuoco", nel quale esaminava dettagliatamente il ciclo di Carnot. Lo scopo di quell'opera fu quello di incoraggiare i miglioramenti nell'ambito dei motori a vapore da un punto di vista ingegneristico.

In quel periodo, i motori a vapore erano estremamente diffusi ed erano costantemente migliorati, al punto che alcuni bastimenti a vapore erano già riusciti a compiere la traversata dell'Atlantico cinque anni prima del saggio di Carnot. Quasi nessuno, però, si era mai interrogato scientificamente sui principi alla base del propulsore a vapore. Per questo motivo, i miglioramenti erano basati esclusivamente sull'esperienza diretta e su "congetture" meccaniche. Carnot decise di approfondire quelle che erano le caratteristiche del propulsore termico relativamente alle cause naturali, piuttosto che ciò che era causato dalla struttura, dal meccanismo o dal funzionamento del motore.

L'importanza del contributo di Carnot non venne subito compresa. Ironia della sorte, nel 1832, mentre conduceva uno studio sul colera, Carnot finì per contrarre la malattia, morendo a soli 36 anni. Come era usanza in tutti i casi di decesso legati al colera, quasi tutti i documenti con i risultati delle ricerche e gli studi di Carnot furono distrutti dopo la sua morte.

Anche dopo la morte di Carnot, però, le sue idee furono riprese da un suo compagno di studi di nome Clapeyron. Questo portò a una loro larga diffusione e a un apprezzamento diffuso, che portò in breve tempo Carnot a essere considerato un pioniere nei campi della termodinamica e della meccanica statistica.

RÉFLEXIONS
SUR LA
PUISSANCE MOTRICE
DU FEU
ET
SUR LES MACHINES
PROPRES A DÉVELOPPER CETTE PUISSANCE.
Par S. CARNOT,
A PARIS,
CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,

SUGGERIMENTI

Occorre notare che William Thompson, l'uomo che formulò in un'equazione matematica il rendimento teorico del ciclo di Carnot, arrivò a definire il concetto di temperatura assoluta proprio tramite la derivazione del rendimento teorico del ciclo di Carnot.

Un veicolo a quattro ruote realizzato nel 1886 da Gottlieb Daimler

Il motore a benzina montato sul veicolo a quattro ruote di Daimler, con cilindrata da 462 cc, 680 RPM e 1,1 CV

Il motore del prima citato veicolo a tre ruote realizzato da Karl Benz. Mentre il motore di Daimler presentava il cilindro in posizione verticale, in questo caso la posizione era orizzontale. 984 cc di cilindrata, 400 RPM e 0,96 CV.

3-4 Rendimento teorico dei motori delle vetture

▶ Esaminare il rendimento teorico del ciclo Otto e del ciclo Diesel

Ciclo Otto

Ora che abbiamo compreso che cos'è un propulsore termico ideale, osserviamo il vero motore di una vettura. I moderni motori a benzina si basano sul ciclo a quattro tempi, o ciclo Otto, inventato da Nikolaus Otto. I quattro cicli del ciclo Otto sono (1) compressione adiabatica, (2) aggiunta di calore isocora, (3) espansione adiabatica, (4) scarico di calore isocoro. L'aggiunta e lo scarico di calore isocori fanno riferimento al riscaldamento e al raffreddamento della sostanza operante all'interno del cilindro, senza che muti il volume di quest'ultimo.

Come nel caso del ciclo di Carnot, il raggiungimento del rendimento massimo con il ciclo di Otto si può illustrare usando un motore ad aria con sorgenti a temperatura elevata e bassa, muovendo i pistoni molto lentamente. Nel caso del ciclo Otto, però, lo squilibrio nella temperatura durante i cicli isocori (2) e (4) non può essere evitato. Dato che il ciclo Otto non include una trasformazione isoterma, il trasferimento termico non può verificarsi fra la sorgente a temperatura elevata e l'aria, oppure dall'aria alla sorgente a bassa temperatura, senza che si riscontri una differenza in temperatura, causa di un trasferimento termico non necessario. Per questo motivo, tale trasferimento termico rende il ciclo Otto relativamente inefficiente in rapporto al ciclo di Carnot.

Il rendimento termico teorico del ciclo Otto viene rappresentato matematicamente come:

$$\text{Rendimento teorico del ciclo di Otto} = 1 - \frac{1}{\text{Rapporto di}^{\text{compressione del calore specifico - 1}}}$$

Come mostrato dalla formula, il rendimento teorico del ciclo Otto è differente da quello del ciclo di Carnot. Esso viene determinato dal meccanismo del motore e dalle caratteristiche della sostanza operante in relazione alla compressione e al rapporto del calore specifico: bisogna però rilevare che non esiste alcun limite al tipo di meccanismo da usare per la compressione e alla sostanza operante da utilizzare. Anche se il propulsore presenta diverse variabili e meccanismi complicati, la compressione e il rapporto del calore specifico determinano il rendimento teorico del motore.

Figura 3-4-1 Processi del ciclo Otto

(1) Compressione adiabatica
(2) Aggiunta di calore isocora — Sorgente a temperatura elevata
(3) Espansione adiabatica
(4) Scarico di calore isocoro — Sorgente a bassa temperatura

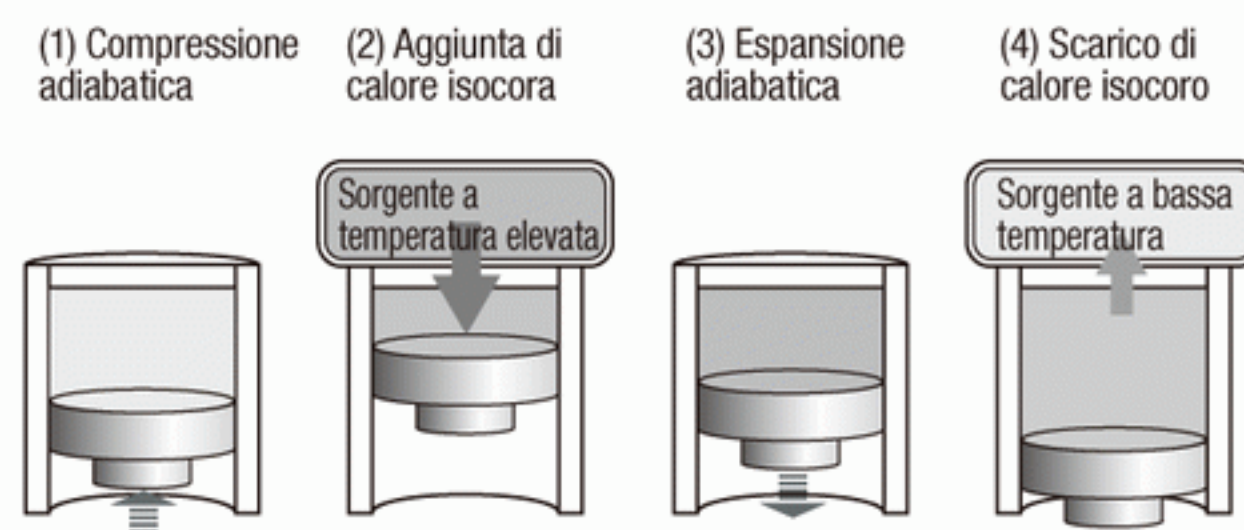
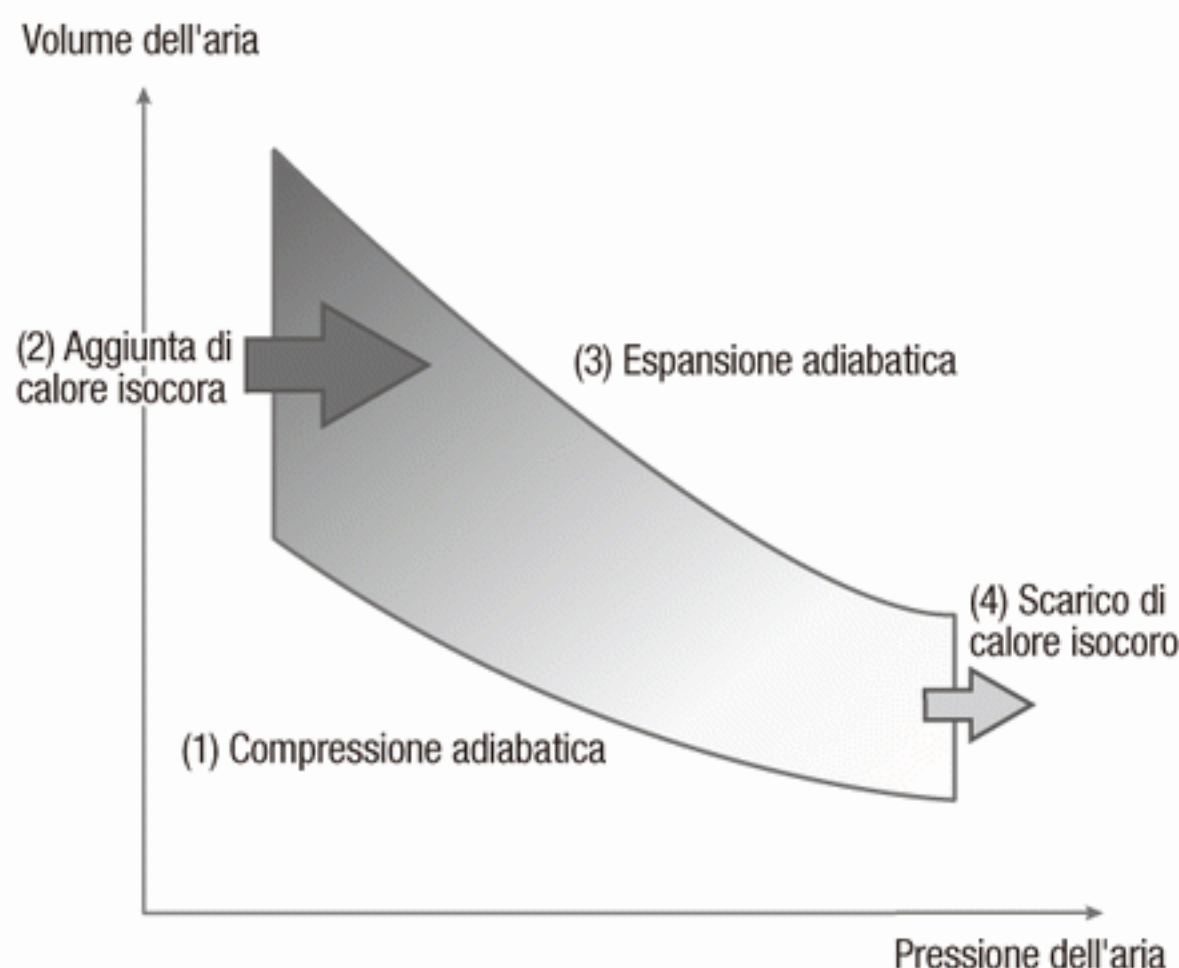



Figura 3-4-2 Cambiamenti della pressione dell'aria e del volume nel ciclo Otto

Volume dell'aria
(2) Aggiunta di calore isocora
(3) Espansione adiabatica
(4) Scarico di calore isocoro
(1) Compressione adiabatica
Pressione dell'aria

Esempio di ciclo Otto. Motore a benzina BMW V8 Twin Power turbo.

SUGGERIMENTI Il ciclo termodinamico del ciclo Atkinson, utilizzato per lo più su vetture ibride, è identico a quello del ciclo Otto. Consulta la sezione "Suggerimenti" in 3-7.

Rendimento teorico del ciclo Diesel

Il ciclo Diesel è il ciclo termodinamico del motore diesel, inventato da Rudolf Diesel. I quattro processi del ciclo Diesel sono: (1) compressione adiabatica, (2) aggiunta di calore isobara, (3) espansione adiabatica e (4) scarico di calore isocoro. L'aggiunta di calore isobara fa riferimento al riscaldamento della sostanza operante all'interno del cilindro, senza che muti la pressione di quest'ultimo.

Il rendimento termico teorico si può ricavare tramite la formula a fronte:

Figura 3-4-3 Processi del ciclo Diesel

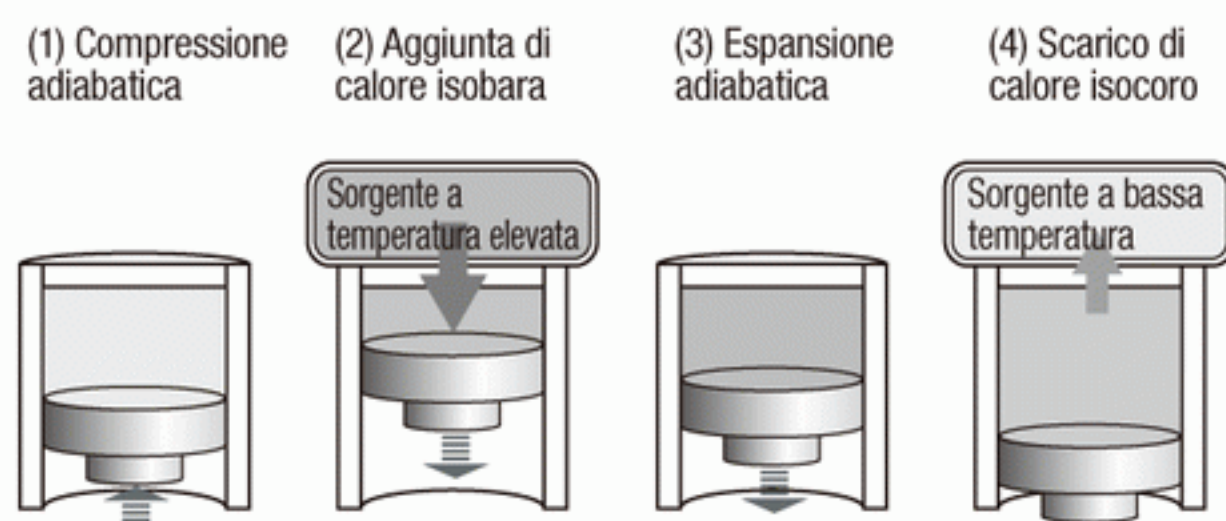
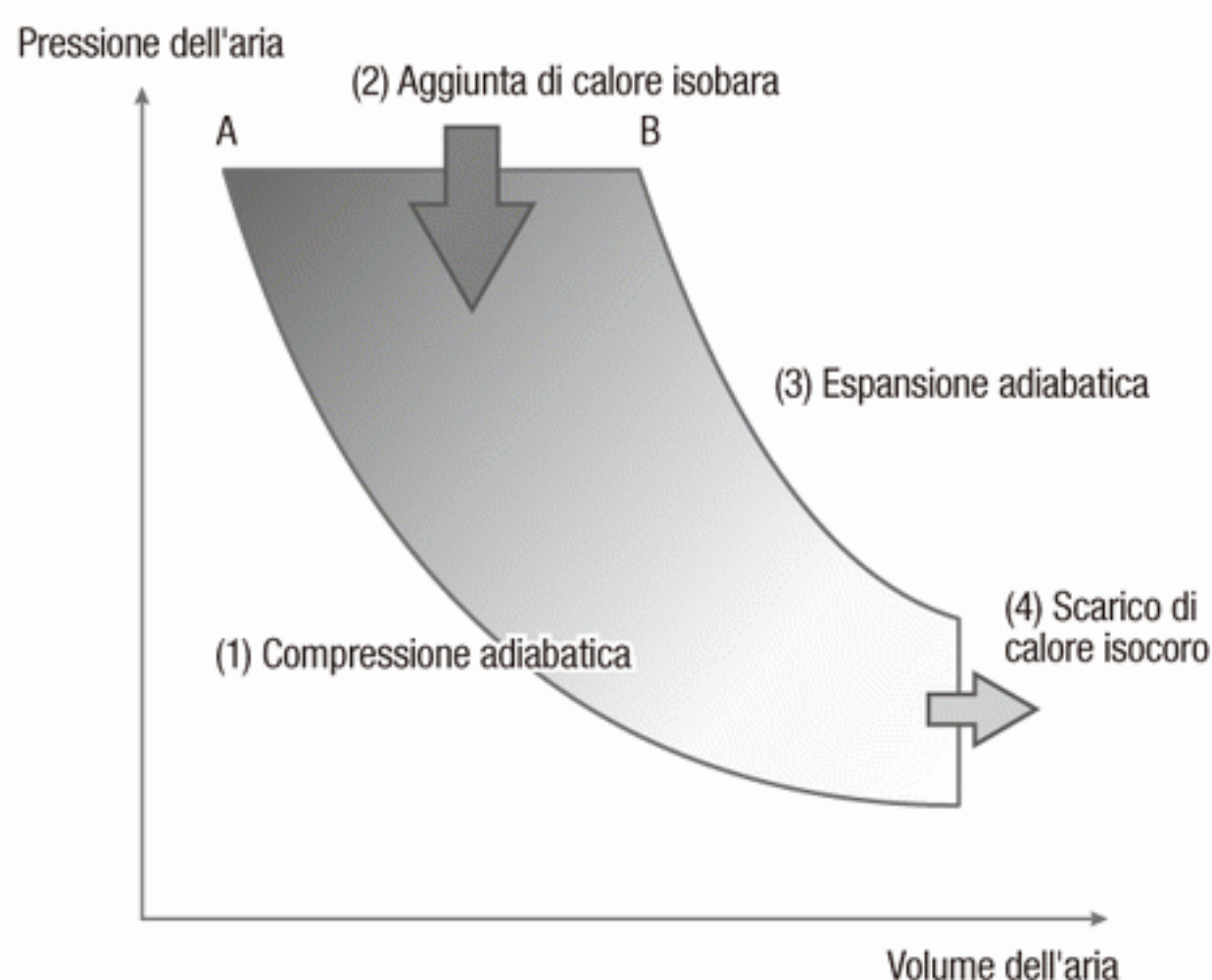



Figura 3-4-4 Cambiamenti della pressione dell'aria e del volume nel ciclo Otto

$$\text{Rapporto volumetrico di combustione} = \frac{\text{volume B}}{\text{volume A}}$$

$$\text{Rendimento teorico del ciclo Diesel} = 1 - \frac{1}{\text{Compressione}^{\text{Rapporto tra i calori specifici} - 1}} \cdot \frac{\text{Rapporto volumetrico di combustione}^{\text{Rapporto tra i calori specifici}} - 1}{\text{Rapporto tra i calori specifici}\left(\text{Rapporto volumetrico di combustione} - 1\right)}$$

Viene determinato da tre soli fattori: rapporto volumetrico di compressione, rapporto tra i calori specifici e rapporto volumetrico di combustione. Per ottimizzare il rendimento del ciclo Diesel, il pistone dev'essere spostato di nuovo con estrema lentezza. Comunque, il trasferimento termico è inevitabile nei cicli (2) e (4). Per questo motivo, il trasferimento termico del ciclo Diesel è relativamente inefficiente, se comparato con quello del ciclo di Carnot.

Esempio di ciclo Diesel. Motore diesel Mazda da 2,2 litri.

Tutti e tre i cicli (ciclo di Carnot, ciclo di Otto e ciclo Diesel) non riescono a raggiungere il rendimento teorico di un propulsore termico. Nella realtà, il movimento infinitamente lento del pistone che servirebbe per ottenere il rendimento massimo non genera alcun effetto utile. Inoltre, anche le temperature di pistone e cilindro non possono essere completamente isolate, il che porta alla presenza di un trasferimento termico non necessario per via delle differenze di temperatura. Anche l'attrito fra pistone e cilindro non può essere evitato. La definizione del rendimento teorico permette, però, di identificare con chiarezza la vera natura di ogni propulsore termico, fornendo agli ingegneri dei principi guida estremamente preziosi.

3-5 Trasformazione reversibile e trasformazione irreversibile

▶ Il cambiamento naturale avviene in una direzione

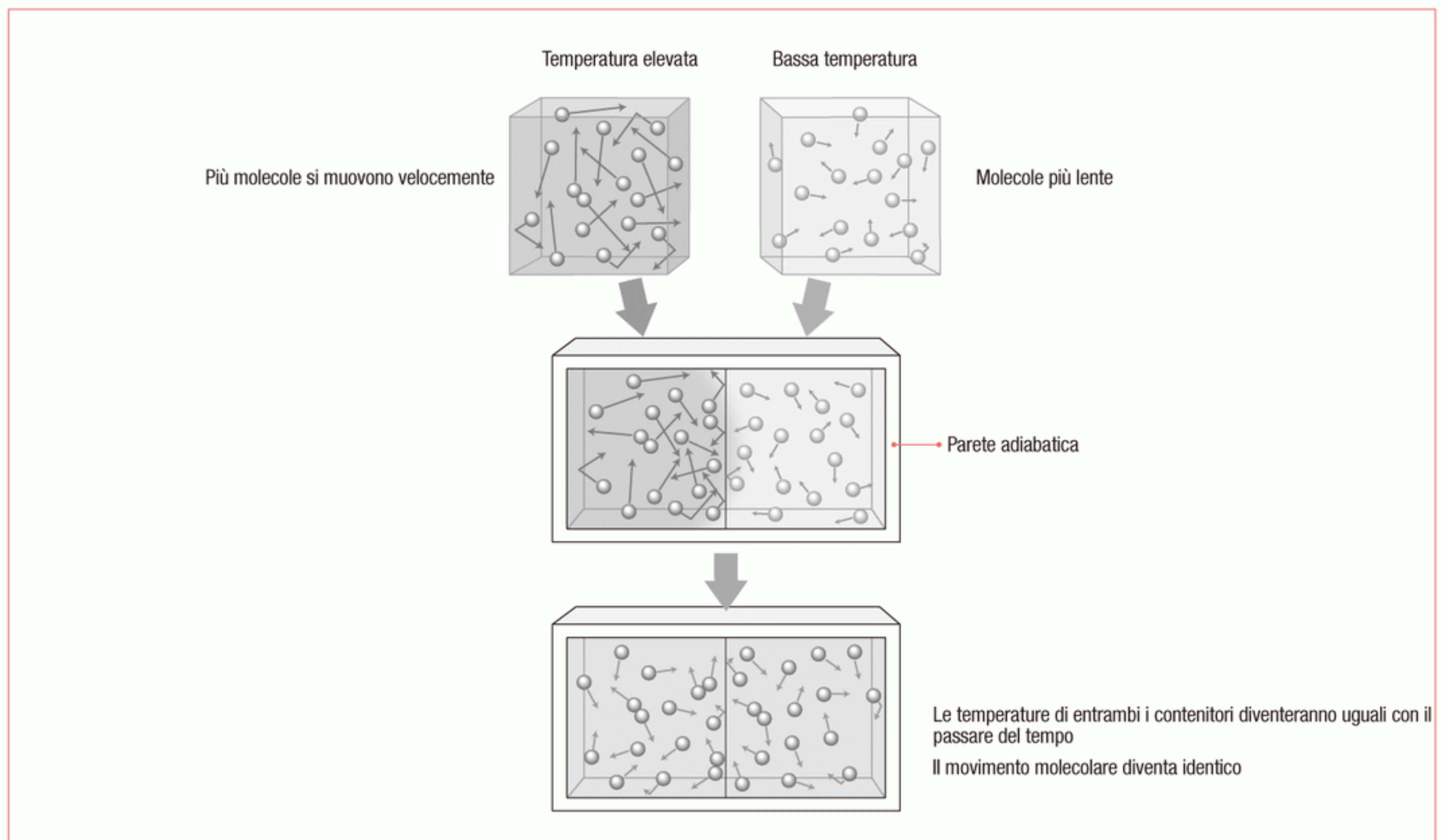
Ora esaminiamo l'inevitabile dissipazione di energia che emerge dai principi trattati nei paragrafi precedenti. Prima di addentrarci nei dettagli, però, è necessario spiegare una legge di importanza fondamentale.

La natura cambia dall'ordine al disordine

Osserviamo di nuovo le molecole di gas all'interno di un contenitore: questa volta, però, utilizzeremo un contenitore con gas a temperatura elevata e un altro contenitore con al suo interno un gas a bassa temperatura. Se i due contenitori vengono posti a contatto fra loro, il calore di quello a temperatura elevata si trasferirà al contenitore a bassa temperatura. In mancanza di interazioni con l'ambiente esterno, i due contenitori raggiungeranno in breve tempo una temperatura media, interrompendo qualsiasi ulteriore scambio termico e raggiungendo una condizione di equilibrio.

Da una prospettiva microscopica, inizialmente, il contenitore con all'interno il gas a temperatura elevata contiene un numero relativamente più grande di molecole in movimento rapido, mentre quello a bassa temperatura contiene un numero relativamente più ridotto di tali molecole. Quando i due contenitori entrano a contatto fra loro, l'energia cinetica delle molecole all'interno del contenitore a temperatura elevata si trasferisce al contenitore a bassa temperatura, incrementando l'energia cinetica delle molecole all'interno di quest'ultimo. Quando tutte le molecole di entrambi i contenitori hanno raggiunto l'energia cinetica (temperatura) media, il trasferimento di energia cinetica (energia termica) tra i due contenitori si arresta.

Figura 3-5-1 Contatto fra due contenitori con temperature diverse

Temperatura elevata
Bassa temperatura
Più molecole si muovono velocemente
Molecole più lente
Parete adiabatica
Le temperature di entrambi i contenitori diventeranno uguali con il passare del tempo
Il movimento molecolare diventa identico

Nessun cambiamento si verifica fra "disordine" e "ordine"

Lo stesso esempio può essere visto da una prospettiva diversa. All'interno di un contenitore vi sono molecole con energia cinetica elevata, mentre l'altro contiene molecole con energia cinetica inferiore, cosa che rende possibile distinguere le differenze nel movimento molecolare all'interno dei contenitori a temperatura elevata e bassa. Si può dire che, all'interno dei contenitori, sono contenute informazioni che permettono di distinguerli. Una volta che i contenitori hanno raggiunto lo stato di equilibrio, però, non risultano più distinguibili. I contenitori vengono quindi a trovarsi in uno stato di "disordine".

In natura, il passaggio da uno stato di "ordine" a uno di "disordine" avviene spontaneamente. Viceversa, il passaggio inverso non può avvenire spontaneamente. Per esempio, quando le sorgenti a temperatura elevata e bassa erano in contatto fra loro, quella a temperatura elevata si è raffreddata e quella a bassa temperatura si è riscaldata, cosa perfettamente naturale. D'altro canto, sappiamo in base all'esperienza che, quando due contenitori dalle diverse temperature vengono messi a contatto, quello con temperatura più elevata non si riscalderà ulteriormente e quello più freddo non andrà incontro a un raffreddamento. Inoltre, a prescindere da ciò che facciamo, non possiamo andare contro natura, riportando i due contenitori, ora in equilibrio, alle loro "esatte" temperature originali, come si potrebbe fare tornando all'inizio di un filmato. Quando il cambiamento non può essere annullato per tornare alla condizione originale, si definisce irreversibile. Se, invece, il sistema può essere riportato alla configurazione originale, si definisce reversibile.

Figura 3-5-2 Una direzione naturale del cambiamento in natura

Ordine

Disordine

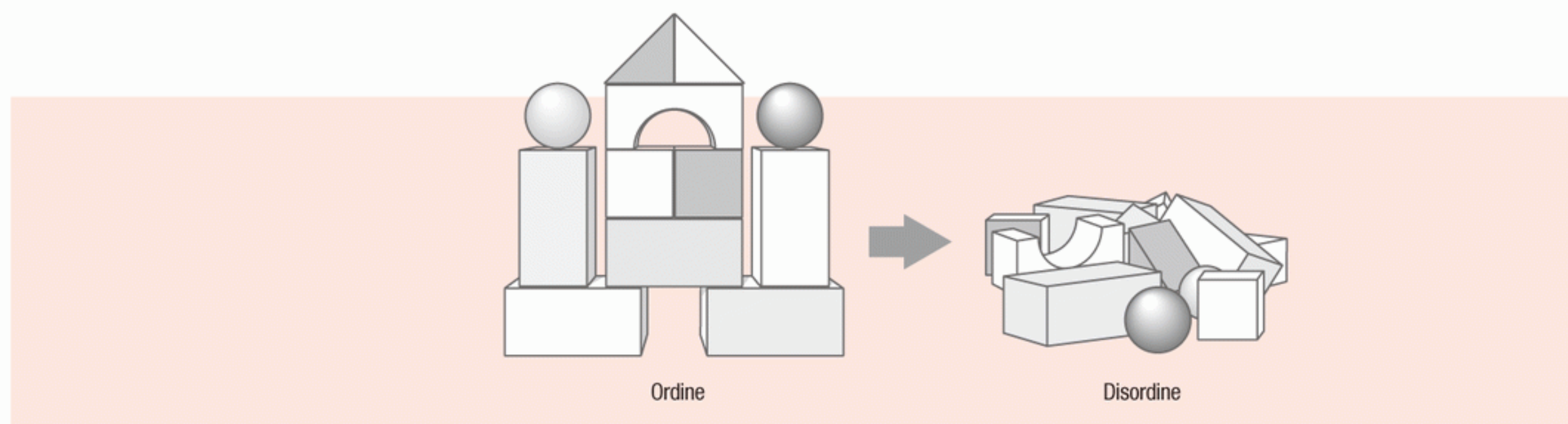
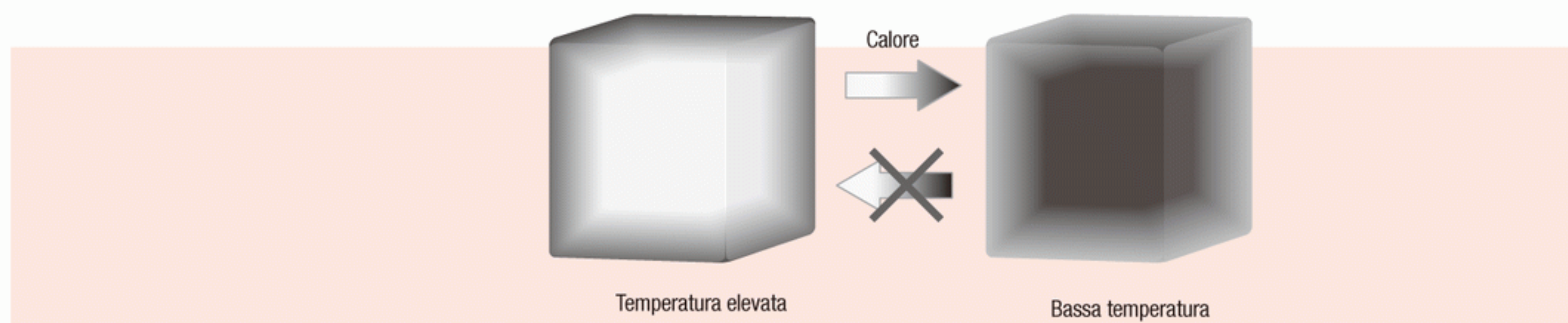



Figura 3-5-3 Il trasferimento termico dalla bassa temperatura a quella elevata non avviene spontaneamente. (* per essere precisi, non è impossibile che un tale fenomeno si verifichi spontaneamente, ma la probabilità è ridottissima e non si tratta di un fenomeno umanamente osservabile.) Se il trasferimento da una bassa temperatura a una elevata viene forzato in modo artificiale, rimane sempre una traccia del procedimento. Per questo motivo, non è possibile il ritorno alle identiche condizioni di temperature elevata e bassa iniziali.

Calore

Temperatura elevata

Bassa temperatura

3-6 Reversibilità del propulsore termico

▶ Differenze fra i cicli reversibili e irreversibili

Dopo le spiegazioni teoriche del ciclo di Carnot, del ciclo di Otto e del ciclo Diesel, una domanda sorge spontanea: perché i veri motori non riescono a raggiungere tali livelli di rendimento teorico? Perché in un motore si verificano delle perdite di energia? La risposta risiede nel fatto che il rendimento teorico del ciclo termodinamico si può ottenere solamente tramite un movimento infinitamente lento e graduale del pistone.

Il processo reversibile del ciclo di Carnot

Torniamo ora al ciclo di Carnot. Definiamo il ciclo di Carnot eseguito nell'ordine (1) → (2) → (3) → (4) un "ciclo progressivo", mentre un processo inverso nell'ordine (4) → (3) → (2) → (1) è un "ciclo inverso". Diamo quindi per assodato che, attraverso il ciclo progressivo del ciclo di Carnot, una certa quantità di calore venga trasferita dalla sorgente a temperatura elevata a quella a bassa temperatura e che, durante questo procedimento, il lavoro derivato venga in qualche modo immagazzinato. Se, quindi, tale lavoro immagazzinato viene utilizzato per attuare un ciclo inverso del ciclo di Carnot, il calore trasferito dal ciclo progressivo alla sorgente a bassa temperatura viene restituito esattamente alla sorgente a temperatura elevata. A questo punto, il lavoro inverso sarà esaurito dal ciclo inverso, senza alcuna rimanenza. In altre parole, il lavoro derivato dal ciclo progressivo del ciclo di Carnot può essere invertito e, quando viene utilizzato per il ciclo inverso, l'intero ciclo viene "riportato alla condizione originaria". Questo è possibile perché nel ciclo di Carnot oggetti con temperature diverse non entrano in contatto tra di loro, cosa che evita scambi termici non necessari. In altre parole, tutti i processi del ciclo di Carnot sono trasformazioni reversibili e questo rende possibile un ciclo inverso.

Figura 3-6-1 Ciclo di Carnot inverso

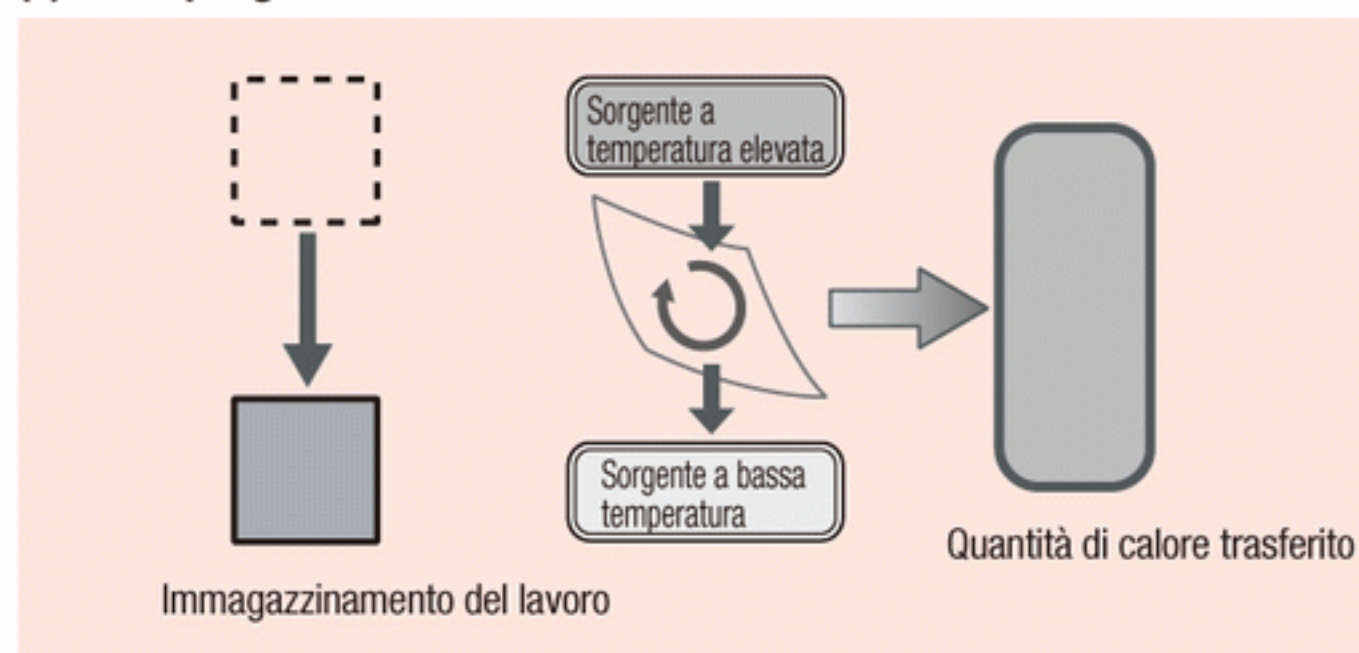
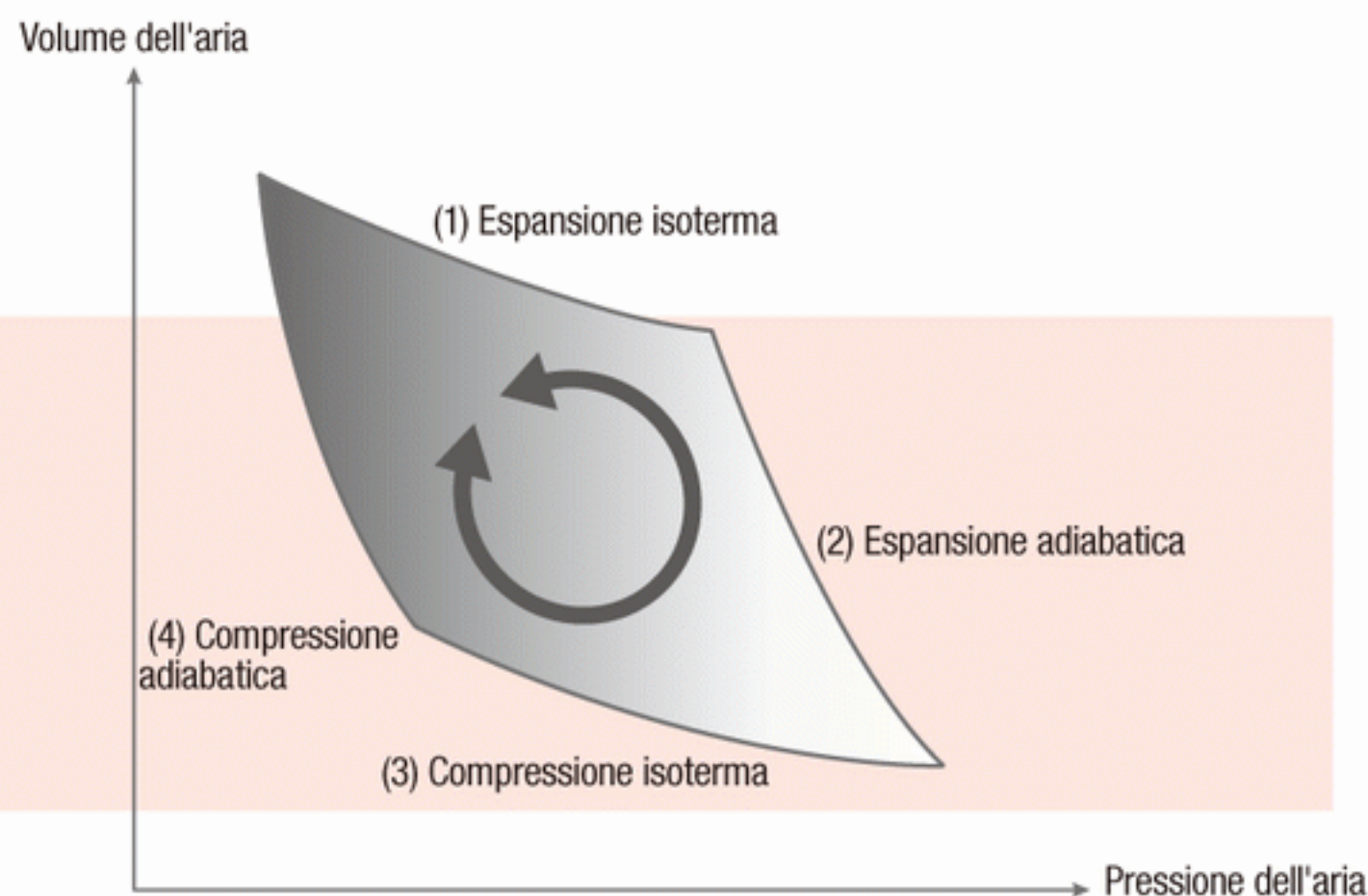
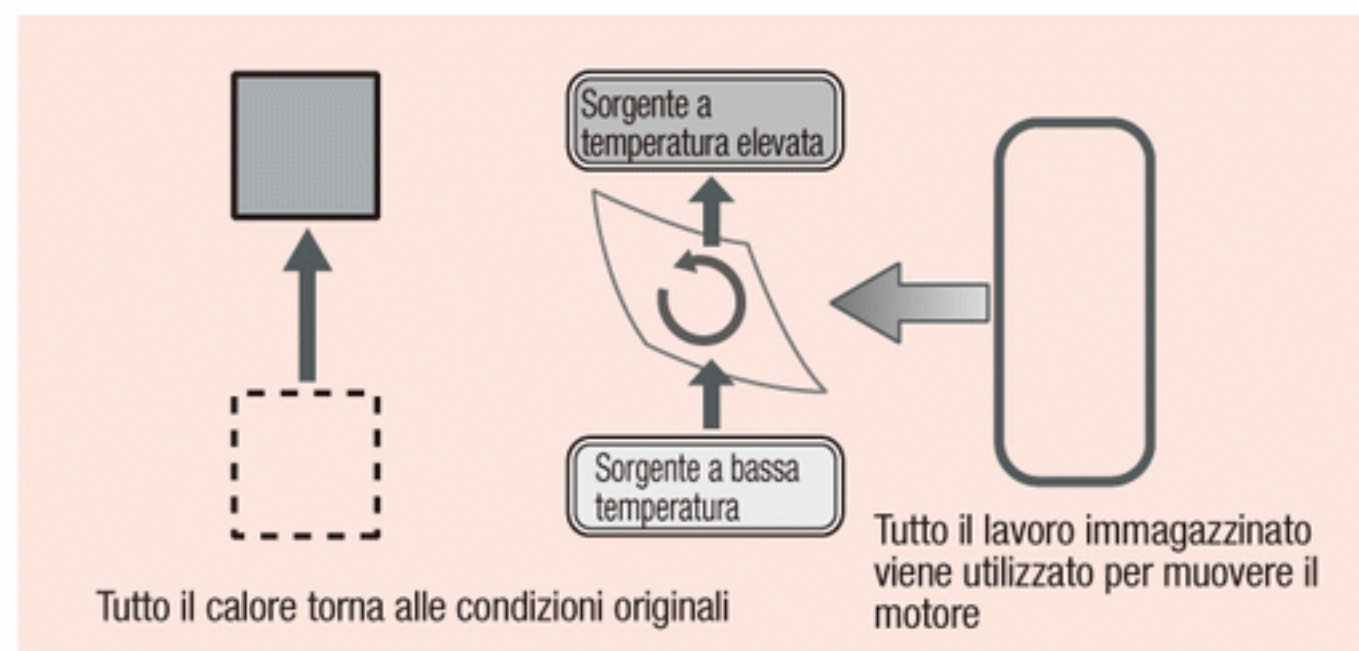



Figura 3-6-2 Natura reversibile del ciclo di Carnot

Tutti i cicli del ciclo di Carnot sono reversibili, pertanto è possibile attuare un ciclo inverso.

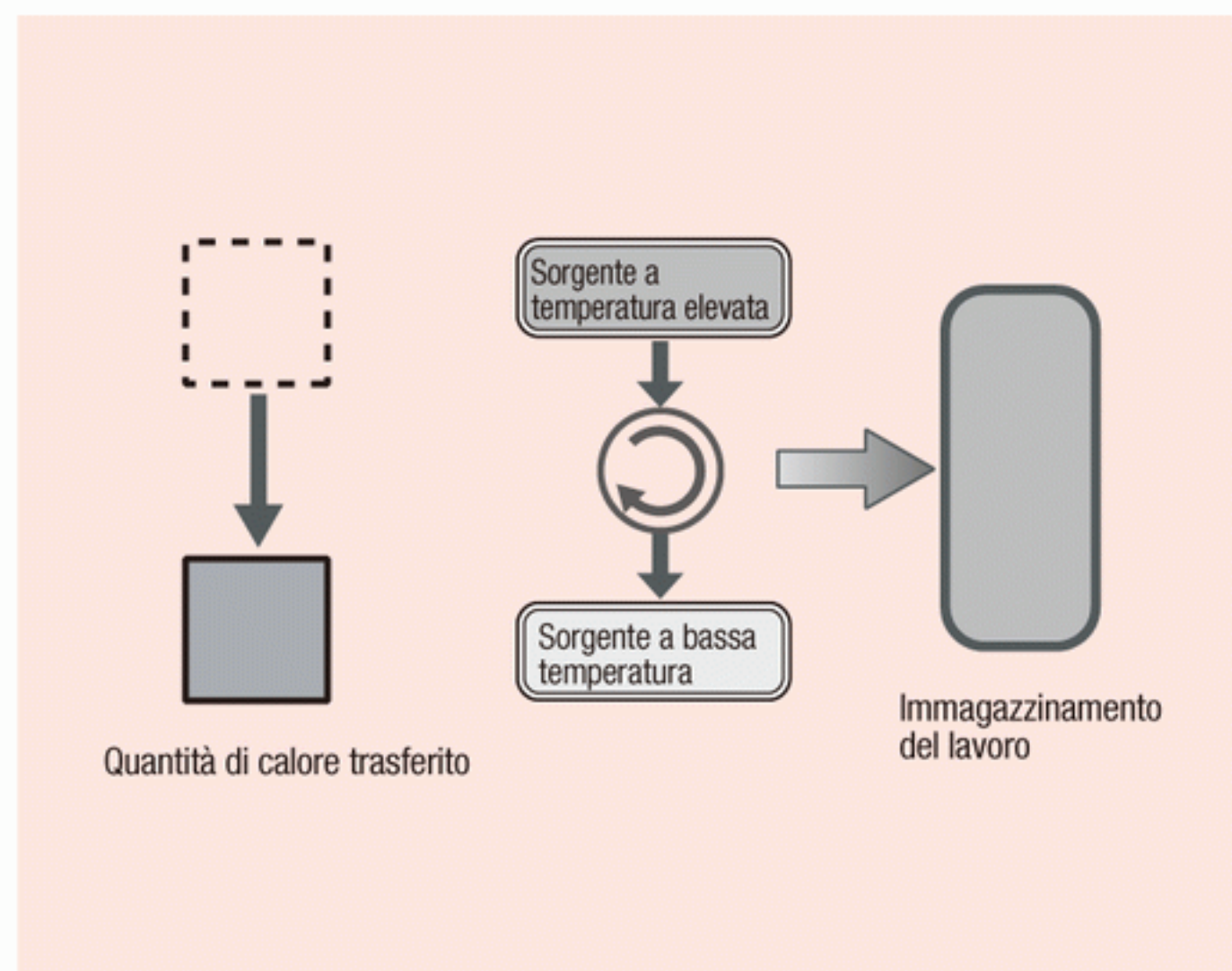
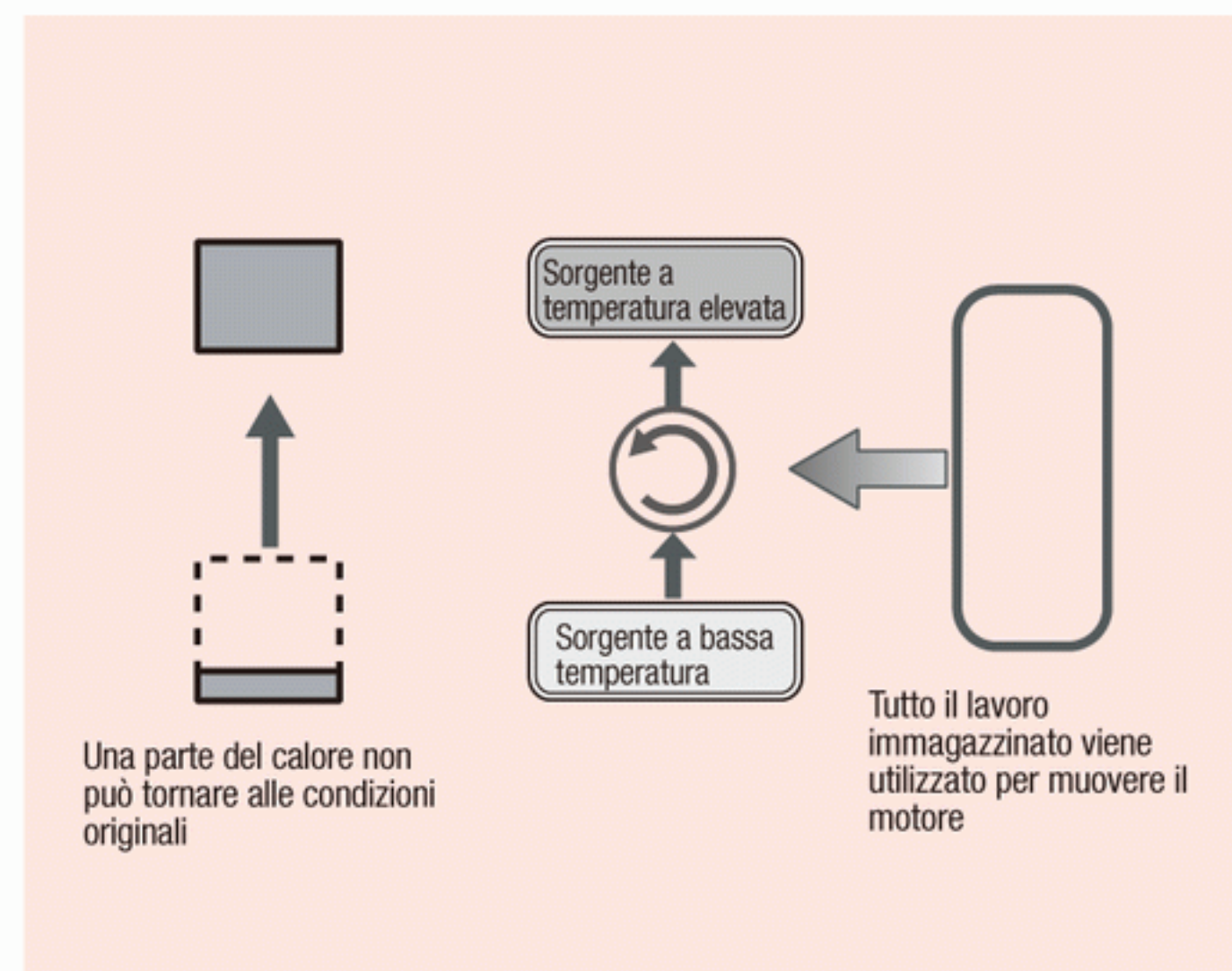
Il ciclo inverso dei motori automobilistici è irreversibile

Consideriamo ora il ciclo Otto e il ciclo Diesel. Come nei casi precedenti, preserviamo il lavoro dal ciclo progressivo e applichiamo il lavoro inverso al ciclo inverso. Anche se priviamo il ciclo inverso del lavoro inverso, tutto il calore non può essere trasferito dal contenitore a bassa temperatura a quello a temperatura elevata e soltanto una parte del calore tornerà alla condizione originaria.

Questo si verifica perché, per il ciclo Otto e il ciclo Diesel, un certo livello di differenza di temperatura è necessario per attuare (2) l'aggiunta di calore isocora e (4) lo scarico di calore isocora, e (2) l'aggiunta di calore isobara e (4) lo scarico di calore isobaro, rispettivamente. Questi processi non generano lavoro utile e causano un trasferimento termico non necessario da temperatura elevata a bassa temperatura. Per questo, in confronto al ciclo di Carnot, il lavoro utile derivato da un ciclo progressivo risulta ridotto di una quantità corrispondente all'energia termica dissipata. Inoltre, durante un ciclo inverso, ci si trova ad andare contro l'ordine naturale, trasferendo calore da una bassa temperatura a una temperatura elevata in un processo con differenze di temperatura, rendendo così necessario ulteriore lavoro.

Questo sottolinea un aspetto molto importante: se un propulsore termico non è in grado di condurre un ciclo inverso reversibile, significa che parte dell'energia prodotta dal lavoro compiuto dal ciclo viene dissipata. Torneremo in seguito su quest'argomento.

Figura 3-6-3 Ciclo di Carnot inverso

(1) Ciclo progressivo

(2) Ciclo inverso

SUGGERIMENTI Se il ciclo di Carnot è reversibile, che cosa rimane dopo aver eseguito un ciclo progressivo seguito da uno inverso? Carnot si rendeva conto che il suo ciclo, che non spreca energia, è il propulsore ideale: qualsiasi motore più efficiente del ciclo di Carnot dovrebbe basarsi sul movimento perpetuo. Dato che si dà per assodata la non esistenza del moto perpetuo, però, non è possibile che questo avvenga.

37 Dissipazione di energia del motore

▶ La dissipazione di energia deriva dal cambiamento irreversibile

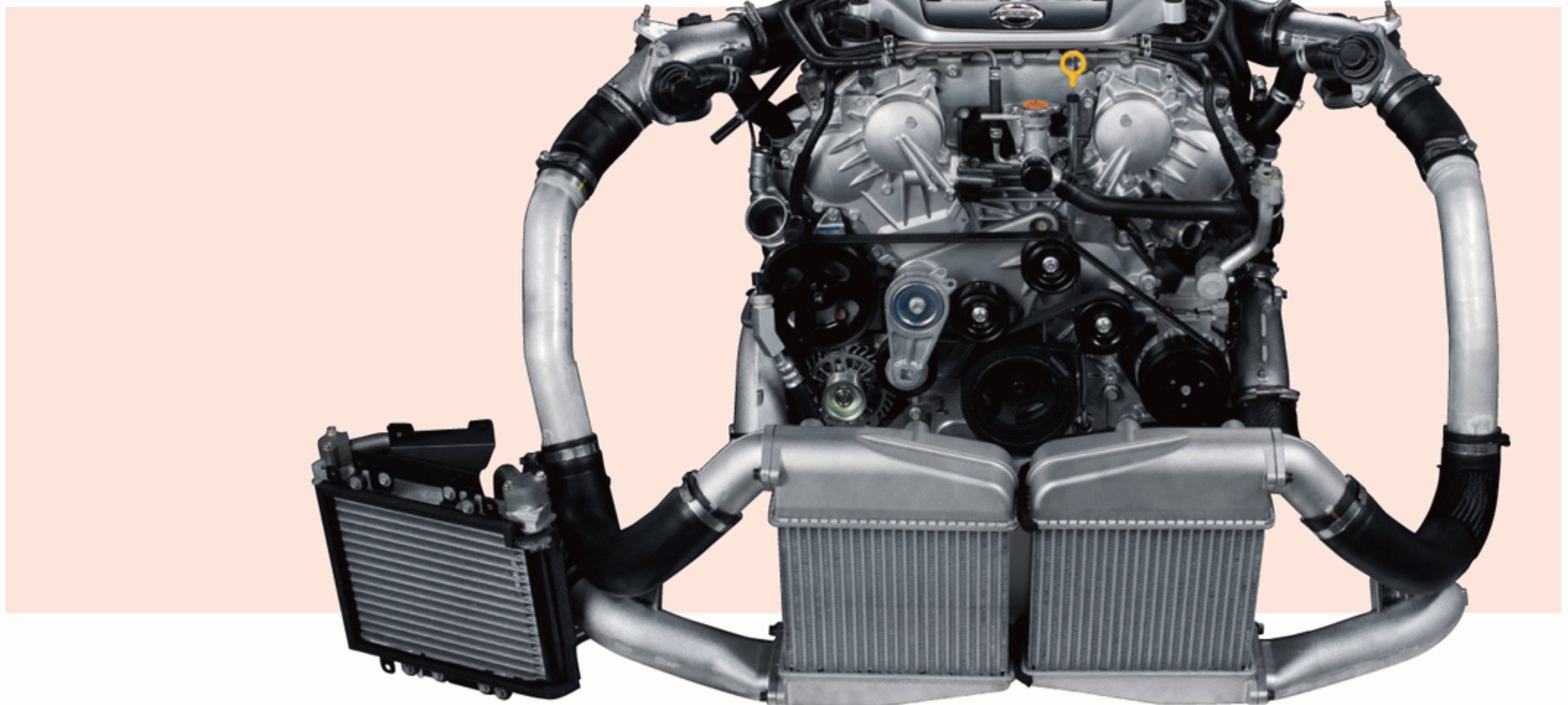
Nel corso delle spiegazioni sul rendimento teorico del propulsore termico, abbiamo più volte ripetuto che "il pistone deve muoversi gradualmente e lentamente". Questa è una condizione necessaria per evitare trasformazioni irreversibili. Ora esploreremo ulteriormente la natura della dissipazione di energia derivante da un cambiamento irreversibile.

Dissipazione di energia del motore

Come mostrato in precedenza, il ciclo di Carnot non trasferisce calore per via delle differenze di temperatura, per cui è possibile un ciclo inverso reversibile. Per quanto riguarda il ciclo Otto e il ciclo Diesel, però, sono presenti processi irreversibili che utilizzano differenze di temperatura per il trasferimento termico, cosa che rende impossibile un ciclo inverso reversibile.

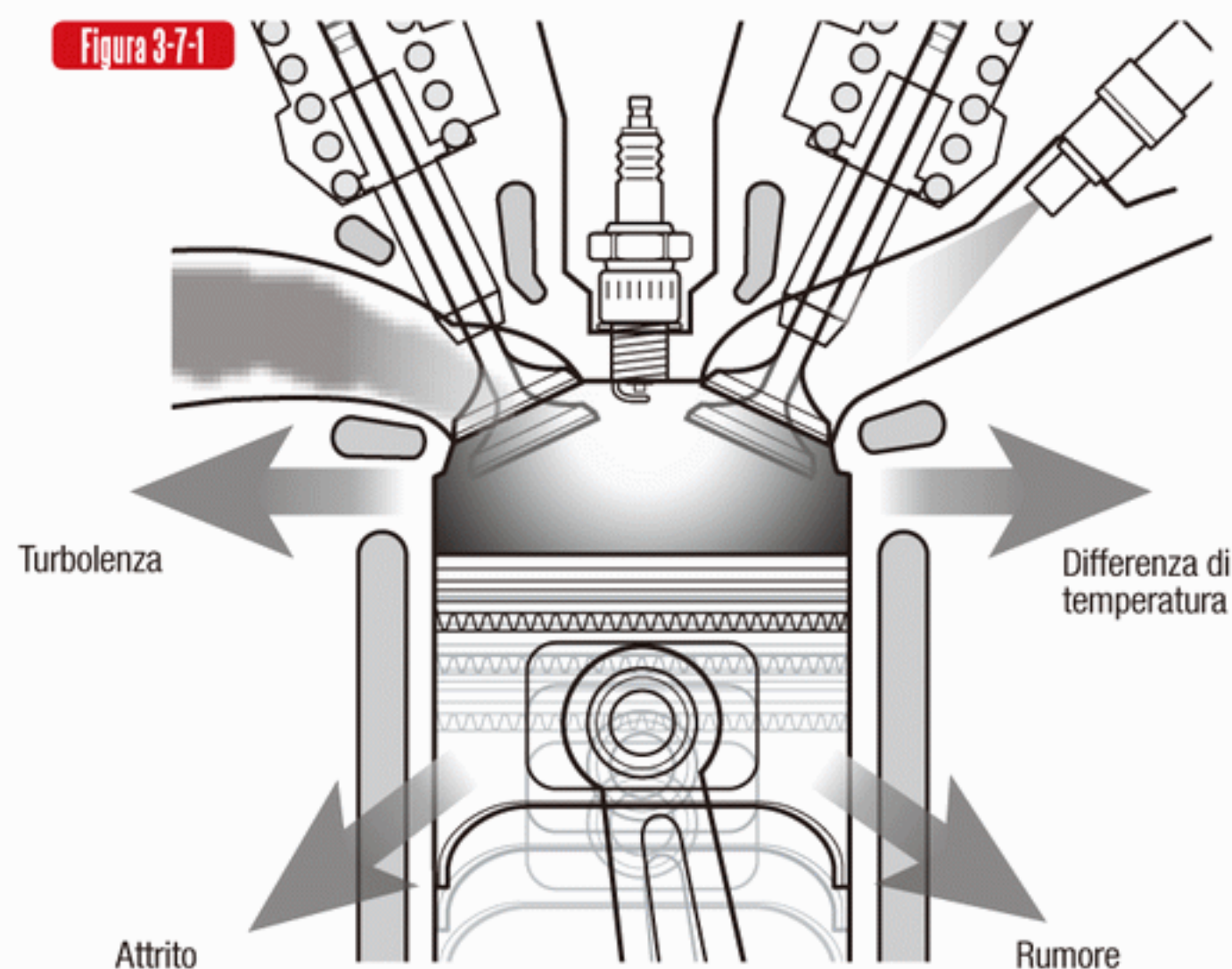
Finora ci siamo concentrati sul concetto di trasformazione irreversibile dovuta al trasferimento termico mediante l'utilizzo di differenze di temperatura, ma se esiste un fenomeno di cambiamento irreversibile all'interno del ciclo di un propulsore termico, il trasferimento termico non può essere sfruttato per ottenere lavoro e finisce per costituire un elemento che riduce la quantità di lavoro possibile.

Quando il motore è in movimento, il calore viene generato dal mutamento chimico del combustibile all'interno del cilindro, utilizzando quindi l'energia creata per muovere il pistone e generare lavoro. A questo punto, il calore crea delle differenze di temperatura, che a loro volta causano un trasferimento termico non necessario. L'attrito fra cilindro e pistone genera rumore e turbolenza, mentre anche il mutamento chimico del combustibile è irreversibile. Ovviamente, dato che questi fenomeni sono irreversibili, quando si verificano non è più possibile tornare esattamente alla condizione originaria, come avverrebbe per esempio tornando all'inizio di un filmato. In altre parole, si è verificato un trasferimento termico non necessario.

Lo sviluppo di un motore è una continua battaglia per l'efficienza. L'immagine raffigura un motore Nissan [VR38], con 6 cilindri a V e cilindrata di 3,8 litri.

Dissipazione di energia meccanica

Finora ci siamo concentrati sui propulsori termici, ma la perdita di energia meccanica avviene interamente a causa della trasformazione irreversibile. Ciò significa che una macchina efficiente è quella che riesce a limitare la quantità di trasformazioni irreversibili. Per creare una macchina efficiente, pertanto, è necessario comprendere che cos'è una trasformazione irreversibile e riuscire a limitarla al massimo.

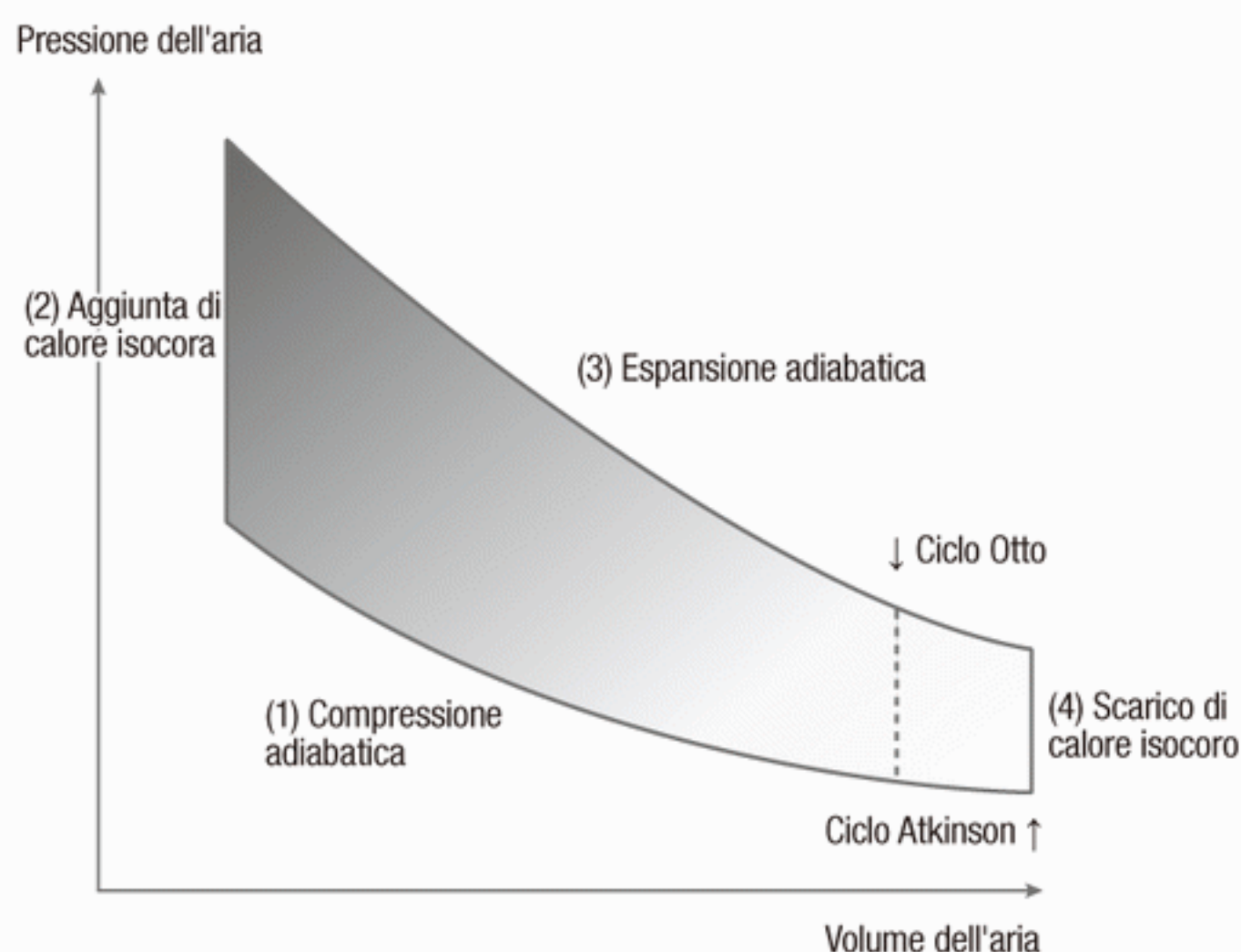
Figura 3-7-1

Turbolenza
Differenza di temperatura
Attrito
Rumore

Quando il pistone viene mosso rapidamente, all'interno del motore avvengono varie perdite energetiche irreversibili.

SUGGERIMENTI Il ciclo di Atkinson utilizza lo stesso ciclo termodinamico del ciclo Otto: prolungando il processo di espansione, il lavoro generato risulta maggiore. Sviluppato per creare un motore che non causi un mutamento irreversibile eccessivo, il ciclo di Atkinson è un ciclo termodinamico che attua il processo di prolungamento del cambiamento adiabatico in (1) e (3) e di riduzione dello scarico di calore isobaro del processo di mutamento irreversibile in (4). Occorre notare che l'espansione adiabatica a temperatura elevata e la compressione adiabatica a bassa temperatura non entrano mai in contatto, cosa che rende necessario un ciclo isocoro che agisca come conduttore.
In modo simile, quando si lavora per ottimizzare il rendimento di un motore in qualsiasi altra macchina, si può dire che si opera sempre al fine di "prevenire la trasformazione irreversibile".

Figura 3-7-2 **Ciclo Atkinson**

Il ciclo Atkinson è un ciclo termodinamico che prolunga il processo adiabatico e riduce la fase di scarico isobarico del calore.

Pressione dell'aria
(2) Aggiunta di calore isocora
(3) Espansione adiabatica
↓ Ciclo Otto
(1) Compressione adiabatica
(4) Scarico di calore isocoro
Ciclo Atkinson ↑
Volume dell'aria

Sulla Honda Accord ibrida è presente un motore a ciclo Atkinson DOHC i-VTEC da 2 litri

Anche il fenomeno più complesso si svolge rispettando regole molto semplici

4 1 Teoria di Bernoulli

▶ Relatività di pressione e velocità di un fluido

Come influisce l'aria attorno all'automobile sulle prestazioni del veicolo? Per rispondere a questa domanda, dobbiamo comprendere la teoria dell'aerodinamica. In questa sezione, introdurremo i concetti aerodinamici di base.

Movimento molecolare in presenza di un flusso (corrente)

Nella sezione precedente, abbiamo spiegato che il rilevamento della pressione sarà identico a prescindere dalla direzione, in uno stato di equilibrio. Una visione macroscopica mostra che le innumerevoli molecole che si muovono in modo disordinato, in realtà sono soggette a collisioni in tutte le direzioni. Da un punto di vista energetico, si può dire che l'energia cinetica delle molecole risulti distribuita uniformemente. Questa viene definita legge di equipartizione dell'energia (da qui in poi, equipartizione).

Se, comunque, c'è un flusso nel movimento delle molecole, l'equipartizione non è più valida. Ci sarà più energia cinetica nella direzione del flusso e meno energia cinetica nelle direzioni diverse. Quando la pressione viene misurata nella regione del flusso, quella nella direzione del flusso è maggiore, mentre quella perpendicolare al flusso risulta minore.

Vale la pena di notare che la somma dell'energia cinetica, prima e dopo un mutamento nella direzione del flusso, non cambia. Per esempio, se da uno stato di equilibrio dovesse originarsi un flusso, la somma dell'energia cinetica dopo la sua comparsa e la somma nelle condizioni di equilibrio risultano identiche. In altre parole, quando avviene un cambiamento nella velocità del flusso, la distribuzione dell'energia cinetica cambia, ma la somma dell'energia cinetica totale si mantiene costante.

Figura 4-1-1 **Movimento delle molecole. Se c'è un flusso per il movimento delle molecole, la pressione più elevata si ha nella direzione del flusso, quella più bassa in un punto perpendicolare alla direzione del flusso.**

Stato di equilibrio
z
y
x
Flusso nella direzione y
z
y
x
Direzione del flusso

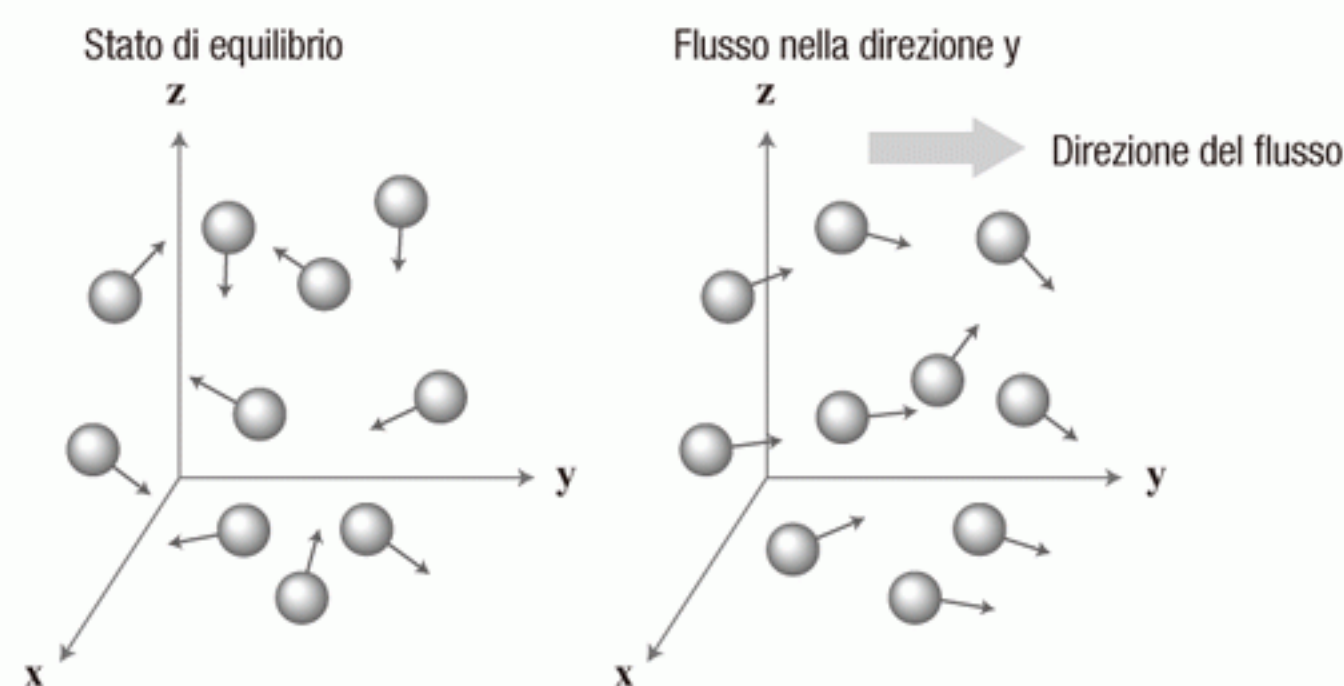



Figura 4-1-2 **Distribuzione dell'energia cinetica molecolare**

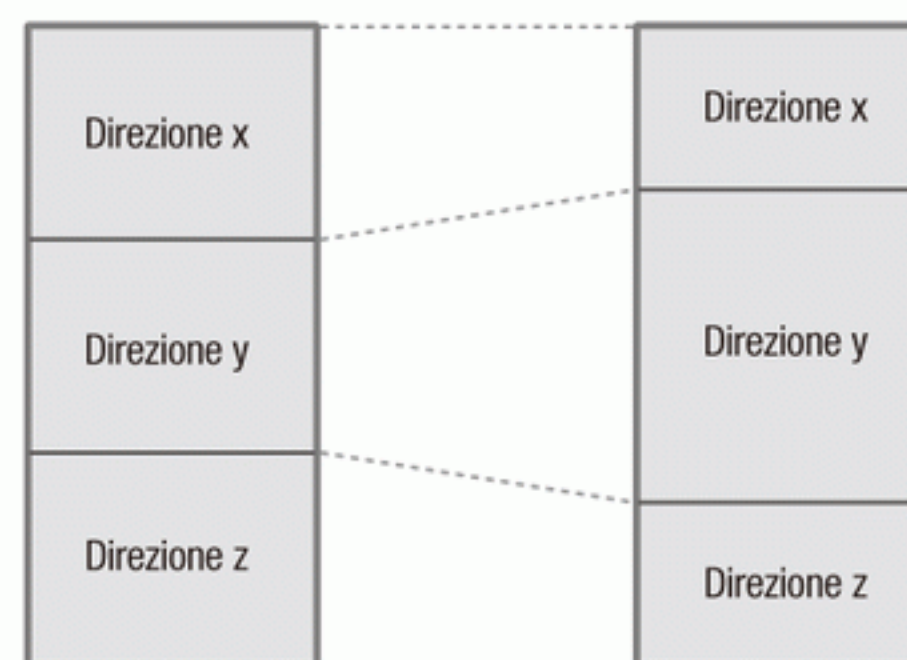
Direzione x
Direzione y
Direzione z
Direzione x
Direzione y
Direzione z

La somma dell'energia cinetica non cambia, anche al mutare della direzione del flusso.

Figura 4-1-3 **Esempio della teoria di Bernoulli**

Serbatoio di dimensione infinita

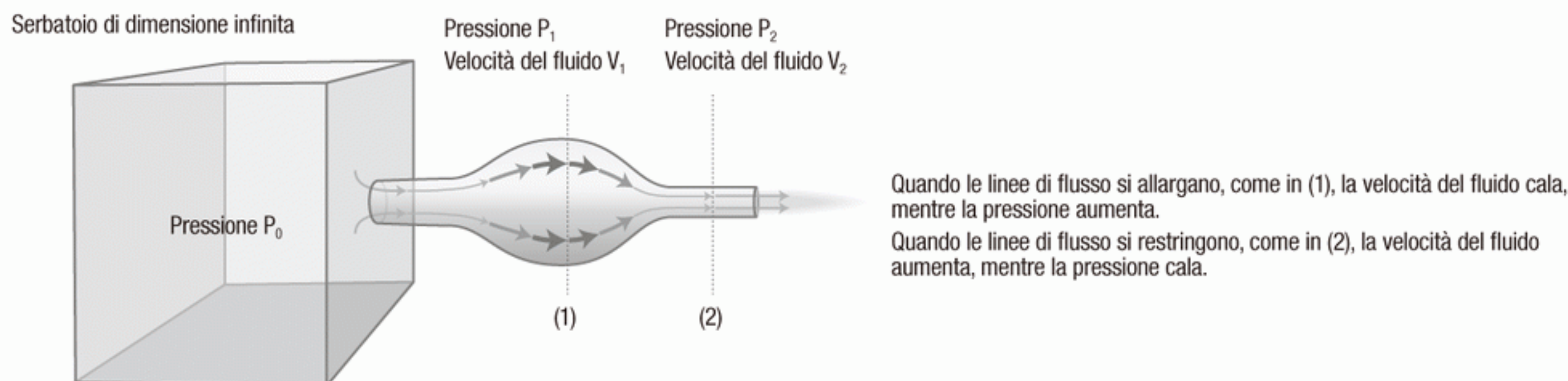
Pressione P_1
Velocità del fluido V_1

Pressione P_2
Velocità del fluido V_2

Pressione P_0

(1)

(2)

Quando le linee di flusso si allargano, come in (1), la velocità del fluido cala, mentre la pressione aumenta.
Quando le linee di flusso si restringono, come in (2), la velocità del fluido aumenta, mentre la pressione cala.

Teoria di Bernoulli

La teoria di Bernoulli definisce la relazione fra la velocità di un fluido e la pressione, quando si verifica una dissipazione di energia a causa di un mutamento del flusso. La teoria di Bernoulli può essere espressa matematicamente di seguito.

Qui P è la pressione, ρ la densità del fluido e V la velocità del fluido. Bernoulli aveva identificato la relazione fra velocità e pressione del fluido partendo dal concetto di "vis viva" (che in latino significa "forza vivente"), non molto dissimile da quello dell'energia. Si ritiene spesso, però, che egli non avesse compreso appieno la relazione fra pressione e velocità. La persona capace di dare alla teoria di Bernoulli una spiegazione matematica completa e corretta fu Leonhard Eulero, un suo caro amico

$$P_0 = P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2$$

Meccanismo di generazione della portanza

Questa sezione spiegherà il meccanismo con il quale il profilo alare genera portanza, utilizzando la teoria di Bernoulli.

La figura 4-1-4 illustra le linee di flusso su un profilo alare. Una linea di flusso è una linea curva basata sulla tangente del vettore della velocità. Si tratta della linea seguita dal flusso. La definizione di una linea di flusso afferma che le linee di flusso non possono mai intersecarsi tra di loro: per questo motivo, un'area che si trova nell'ambito della stessa linea di flusso avrà sempre lo stesso volume di flusso, in ogni parte del flusso stesso. La posizione di uscita del flusso viene definita campo di flusso.

Osservando il campo di flusso nella figura 4-1-4, vediamo che la linea di flusso davanti al profilo alare mantenga una spaziatura costante, mentre possiamo notare come questa risulti più ristretta alla sommità del profilo alare. Dato che il flusso non attraverserà la linea di flusso, si può desumere che la spaziatura delle linee di flusso risulti limitata alla sommità del profilo alare. Ma il volume del flusso entro la linea del flusso non cambia, e la velocità del flusso superiore, dove lo spazio è limitato, diventa notevolmente superiore: quindi, se il percorso del flusso è più ristretto, la velocità di flusso alla sommità del profilo alare risulta maggiore. Per questo, secondo la teoria di Bernoulli, la pressione in questo punto dovrebbe diminuire in modo proporzionale al quadrato della velocità del flusso. Per contro, se il flusso sotto il profilo alare dovesse espandersi, la velocità del flusso calerebbe, facendo aumentare la pressione. Questa differenza di pressione fra parte superiore e inferiore di un profilo alare è ciò che genera la portanza.

Figura 4-1-4 **Meccanismo di generazione della portanza su un profilo alare**

Il passaggio del flusso si restringe sulla sommità dell'ala. Dato che il volume del flusso non cambia, la velocità del flusso aumenta, con il risultato del calo della pressione esercitata sull'ala.

Il volume del flusso è costante

Il passaggio del flusso si restringe

Linea di flusso

Il flusso non interseca mai la linea di flusso

4-2 Legge del moto del fluido

▶ Il significato dell'equazione del moto del fluido

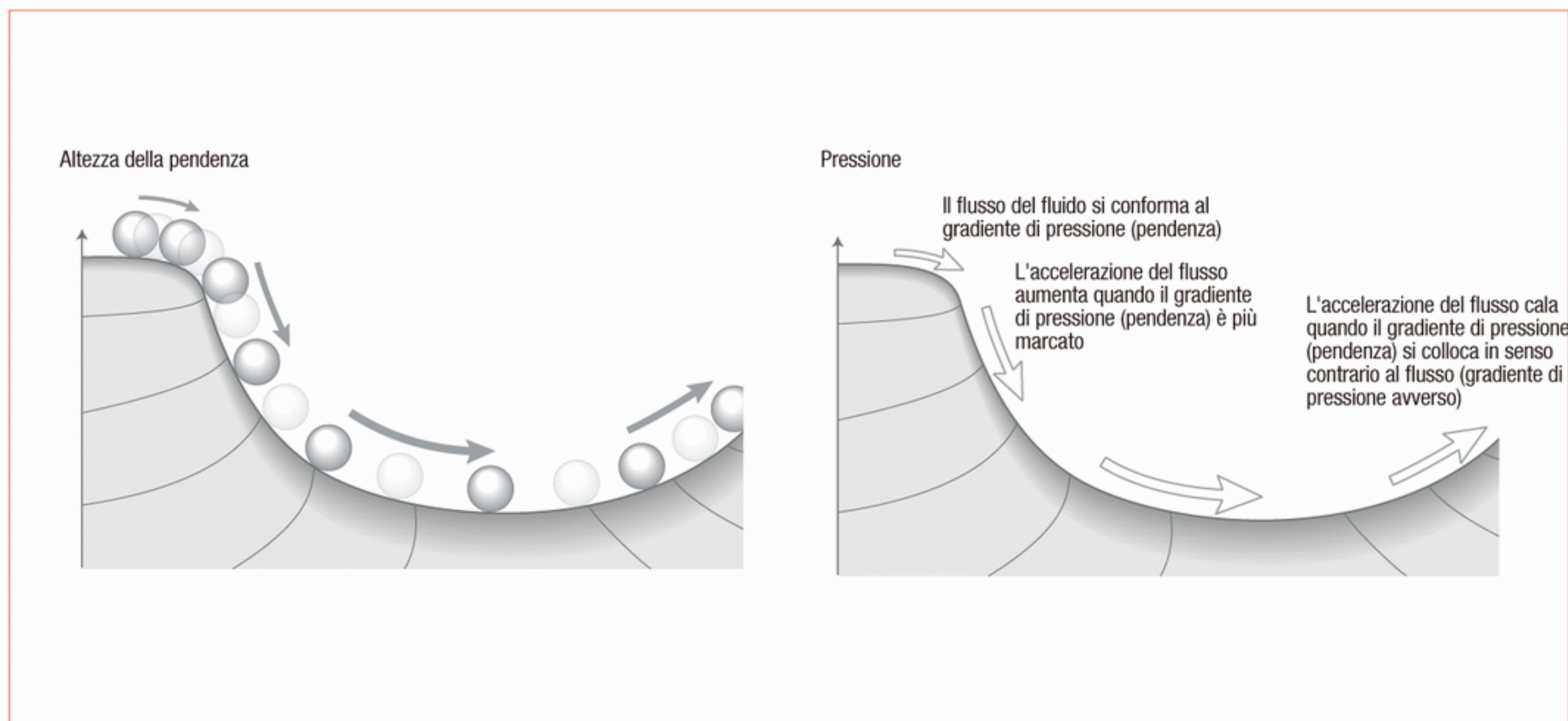
Equazione di Eulero – senza considerare la viscosità

Il primo che derivò l'equazione del movimento del fluido fu Eulero, che aveva già elaborato la formula della teoria di Bernoulli. In termini di progresso dell'idrodinamica, questo risultato fu notevolmente più rilevante della stessa teoria di Bernoulli. L'equazione di movimento derivata da Eulero viene definita equazione di Eulero ed è mostrata sotto.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla P$$

Il membro di sinistra dell'equazione viene definito avvettivo o di convezione e rappresenta l'effetto avvettivo del fluido o, in altre parole, l'effetto causato dal flusso del fluido. Il membro di destra è invece il termine di pressione ed esprime il gradiente (pendenza) della pressione. In breve, Eulero afferma che "il fluido scorre in base al gradiente della pressione".

Un buon esempio di gradiente di pressione è costituito dai grafici della distribuzione della pressione in meteorologia. Durante la stagione invernale in Giappone, masse di aria fredda e secca arrivano dal continente euroasiatico, in quanto il gradiente di pressione sul Giappone è elevato a ovest e basso a est. Se le linee di pressione sono molto ravvicinate fra loro, significa che il gradiente di pressione è molto marcato: per questo motivo, nell'area sono presenti venti molto intensi. Se, invece, le linee di pressione sono distanziate fra loro, indicando un gradiente più piccolo, è lecito aspettarsi dei venti non particolarmente intensi. Questa comprensione del flusso, estremamente intuitiva, è stata formalizzata con successo dall'equazione di Eulero.

Figura 4-2-1 Gradiente di pressione

SUGGERIMENTI L'equazione del moto per un fluido con viscosità nulla si chiama equazione di Eulero. L'equazione discussa in precedenza è relativa a un fluido incomprimibile e a densità costante. Eulero, inoltre, ha formulato un'equazione per il moto di un fluido comprimibile.

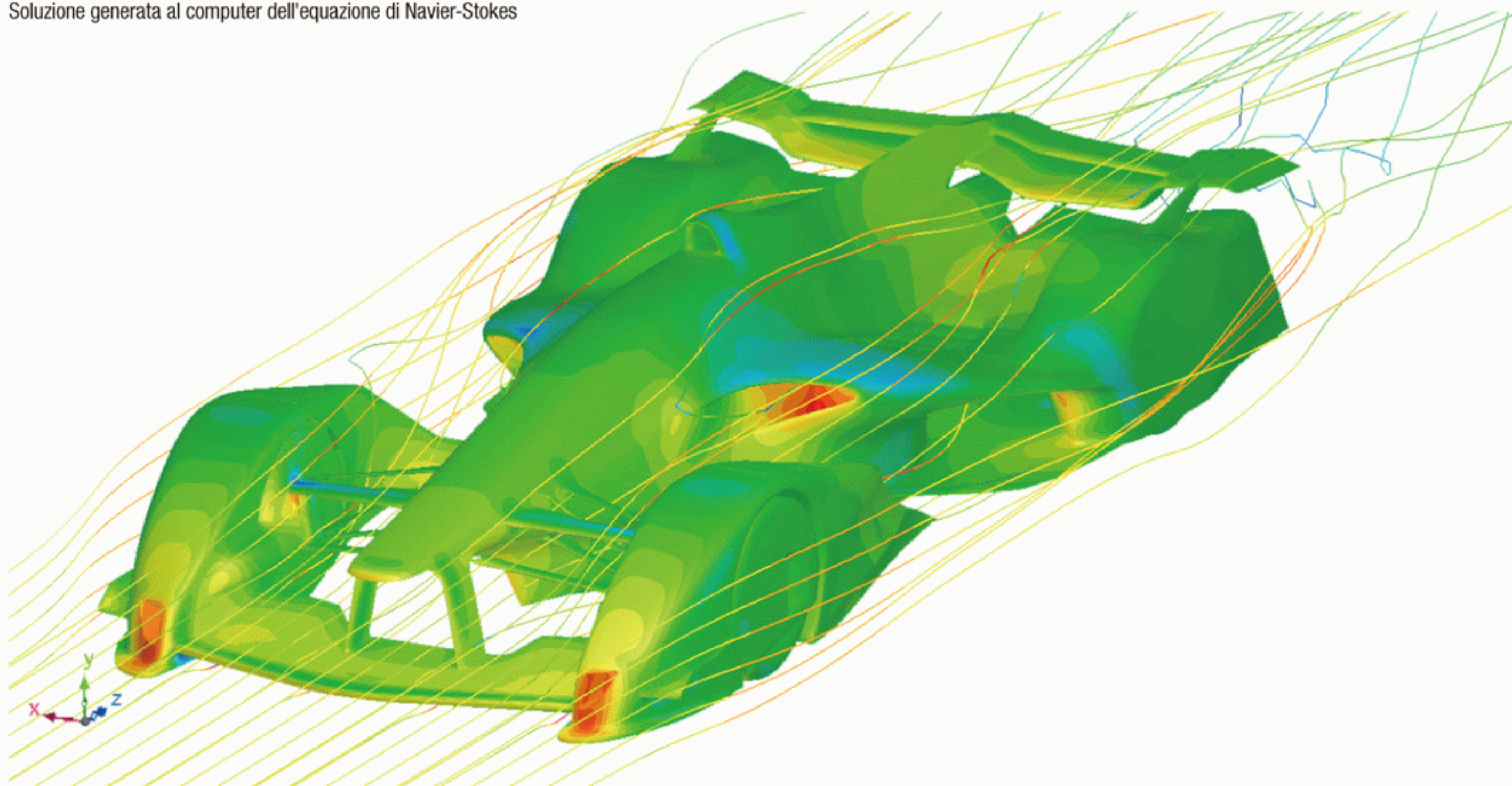
Equazione di Navier-Stokes – con considerazione della viscosità

L'equazione di Eulero esprime una formula matematica che descrive l'effetto del flusso del fluido e il suo rapporto con la pressione: non arrivava, però, a esprimere gli effetti della viscosità dei fluidi, che nella realtà ne rappresenta una proprietà importante. L'equazione del moto che tiene in considerazione gli effetti della viscosità fu derivata nel 19° secolo da Claude-Louis Navier e George Gabriel Stokes. L'equazione di Navier-Stokes è riportata come segue.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla P + \nabla \cdot \tau$$

Come nell'equazione di Eulero, il membro di sinistra dell'equazione è il membro avvettivo (di convezione) e rappresenta l'effetto avvettivo del fluido. La prima variabile sul lato destro dell'equazione è il termine della pressione (sopra), che esprime il gradiente di pressione. La seconda variabile aggiunta si definisce termine di viscosità o diffusione ed esprime la proprietà della viscosità. In breve, l'equazione di Navier-Stokes afferma che "il fluido fluisce in base al gradiente di pressione, ma la viscosità ha un effetto sulla sua quantità di moto". La già citata equazione di Navier-Stokes fa riferimento a un fluido incomprimibile e a densità costante.

SUGGERIMENTI Sia per l'equazione di Eulero, sia per quella di Navier-Stokes, deve ancora essere trovata una soluzione generale. Le equazioni sono applicabili solamente a casi di correnti (flussi) molto specifici e speciali. Per applicare queste equazioni a campi di flusso generali, è necessario utilizzare un computer per risolvere numericamente le equazioni. L'equazione di Navier-Stokes non è solamente un tema di ricerca importante nell'idrodinamica, ma anche un modello matematicamente importante nello studio delle equazioni differenziali alle derivate parziali non lineari. Nel 2000, lo statunitense Clay Mathematics Institute ha offerto un milione di dollari in premio a chiunque riuscisse a risolvere uno dei sette problemi matematici irrisolti, noti anche come Problemi per il millennio (Premio del millennio). Uno di questi sette problemi irrisolti era la dimostrazione dell'esistenza di una soluzione liscia dell'equazione di Navier-Stokes.

Soluzione generata al computer dell'equazione di Navier-Stokes

4-3 Superficie di discontinuità e filamento vorticoso

▶ Strategia per la risoluzione dell'equazione del moto del fluido

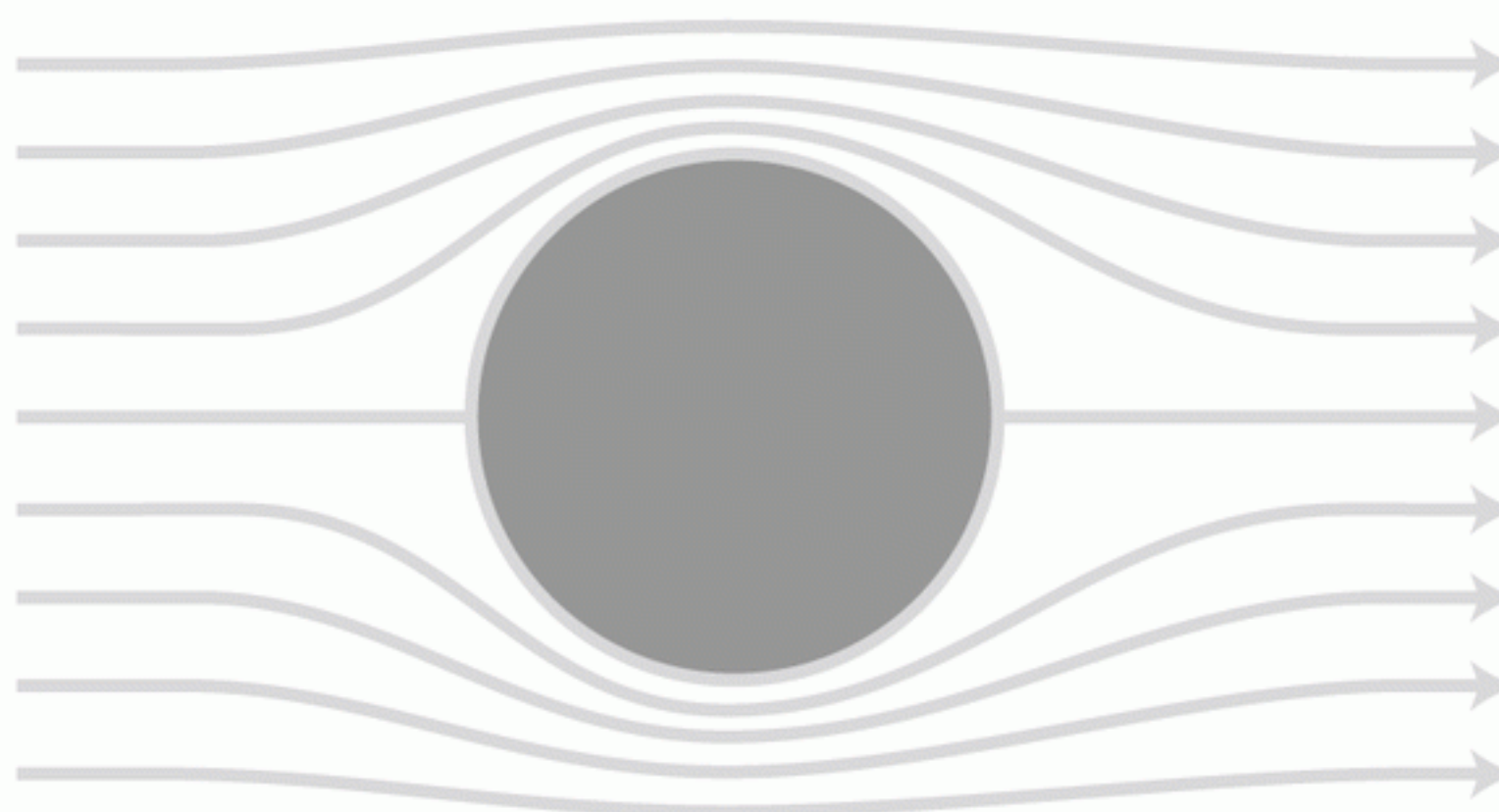
Anche se sia l'equazione di Eulero, sia l'equazione di Navier-Stokes esprimono correttamente il moto dei fluidi, per via dell'elevata complessità matematica, non risultavano applicabili praticamente al reale flusso di un fluido. Dato che la soluzione non sembrava a portata di mano, si è deciso di procedere con un approccio analitico, senza utilizzare queste equazioni.

Paradosso di d'Alembert

D'Alembert, che conosceva a fondo tanto Bernoulli quanto Eulero, ricercò la soluzione teorica della resistenza (una forza che si verifica in senso parallelo alla velocità di flusso, nella direzione opposta) creata da un cilindro circolare inserito in un flusso uniforme bidimensionale. La soluzione derivata era però nulla, quando in realtà la resistenza non può mai essere nulla. Non erano presenti errori di calcolo e la formula e il risultato, zero, si ripresentarono più volte a chiunque tentasse la soluzione. Nei seguenti 160 anni, l'equazione divenne uno dei principali problemi dell'idrodinamica, prendendo presto il nome di "paradosso di d'Alembert".

Grazie alle conoscenze odierne, possiamo comprendere come nessuno dei calcoli eseguiti da d'Alembert fosse errato e che la risposta derivata era logica, dal momento che l'equazione non prendeva in considerazione la viscosità del fluido. In condizioni di flusso stabile e uniforme, in assenza di viscosità, il flusso davanti e dietro il cilindro circolare diventerebbe simmetrico. Questo significa che la pressione davanti e dietro sarebbe altresì simmetrica, andando così ad annullarsi e a generare una resistenza pari a zero.

In quel periodo, l'equazione di Navier-Stokes doveva essere ancora scoperta, per cui l'applicazione della viscosità non era chiara. Il paradosso di d'Alembert venne risolto soltanto nel 1904 da Ludwig Prandtl, con l'introduzione del concetto di strato limite.

Figura 4-3-1 Paradosso di d'Alembert

Dato che il flusso è simmetrico rispetto al centro del cilindro, la resistenza diventa nulla.

SUGGERIMENTI I concetti di filamenti vorticosi e superfici di discontinuità sono stati applicati a più campi della portanza: teoria della circolazione, teoria dello strato limite e teoria della linea portante, tutte descritte nelle sezioni seguenti. Il vortice in idrodinamica è diverso dall'aspetto genericamente accettato della spirale: in idrodinamica, un vortice viene definito come una forma di movimento, in particolare una rotazione fortemente confinata.

Il concetto di filamento vorticoso e la superficie di discontinuità

La prima persona ad aprire la via alla comprensione matematica dei movimenti dei fluidi è stato il fisico tedesco Hermann von Helmholtz, che ha ampliato il concetto di vortice fino a inventare una nuova metodologia di comprensione del flusso.

Immaginiamo un elemento fluido che fluisce da sinistra verso destra, come nella figura 4-3-2. Quando la superficie dell'elemento fluido viene esposta a uno sforzo di taglio (una forza che opera per tagliare il materiale, vedi 2-1), emerge una differenza nella velocità dell'elemento fluido che si sposta attraverso la superficie. Come risultato, l'elemento fluido inizia a ruotare, creando un vortice. Se tale vortice venisse esaminato in sezione, avrebbe l'aspetto di filamenti concettuali di dimensioni infinitesimali. Lo strato creato dalla raccolta di questi filamenti vorticosi viene definito strato vorticoso.

Implementando il concetto dei filamenti vorticosi, come illustrato nella figura 4-3-3, è possibile trattare in termini matematici le superfici di discontinuità della velocità, che si creano quando si uniscono flussi di velocità diverse (un piano nel quale la continuità del valore muta drasticamente) e strati limite nei quali la velocità del fluido muta drasticamente attorno a degli oggetti. Tale flusso può essere interpretato come formato dal movimento rotatorio di elementi minuti del fluido, applicando così lo stesso approccio matematico già esistente a un vortice.

Quando Helmholtz introdusse i concetti dei filamenti vorticosi e degli strati vorticosi, ci fu la speranza di risolvere il mistero più grande del secolo, il paradosso di d'Alembert. Appena dopo la presentazione del concetto di discontinuità della superficie da parte di Helmholtz, Kirchhoff e Rayleigh presero a calcolare l'intensità della resistenza su un piano piatto. Secondo il paradosso di d'Alembert, la forza resistente su un piano piatto è pari a zero. Se, come assunto, si presuppone l'esistenza di una superficie di discontinuità oltre i bordi anteriore e posteriore del piano, la superficie opposta si può considerare con velocità di flusso ridotta, andando così a negare l'esistenza del paradosso di d'Alembert. Purtroppo, i tentativi di Kirchhoff e Rayleigh fallirono, dato che le loro stime della pressione sulla presunta superficie opposta del piano erano troppo elevate, ma essi avevano sicuramente intrapreso la giusta direzione.

Figura 4-3-2 Concetto di filamento vorticoso e strato vorticoso. Per illustrare al meglio il concetto dei filamenti vorticosi, questi vengono tracciati con una determinata dimensione. In realtà, la sezione di un filamento vorticoso è di dimensioni infinitesimali.

Linea di flusso
Flusso
Strato vorticoso
Filamento vorticoso
Flusso

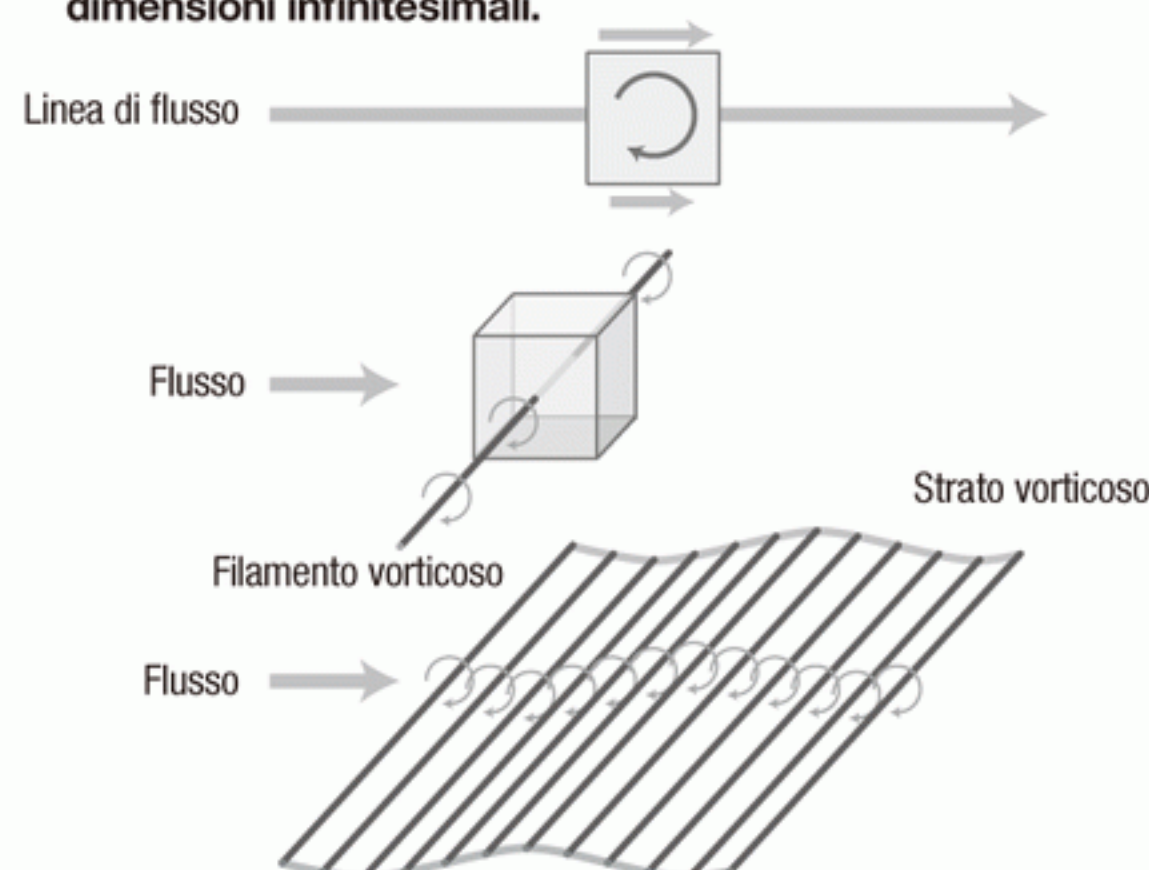



Figura 4-3-3 Differenza di forza tra velocità elevata e ridotta su una superficie di discontinuità

Velocità elevata
Velocità ridotta

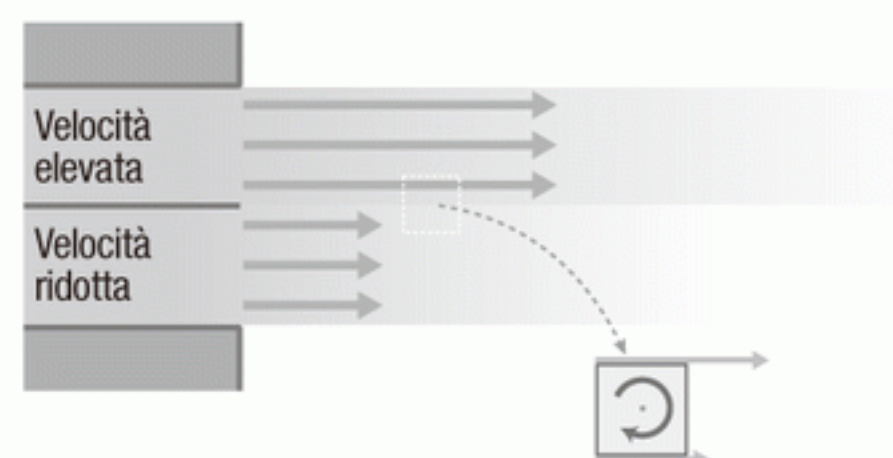



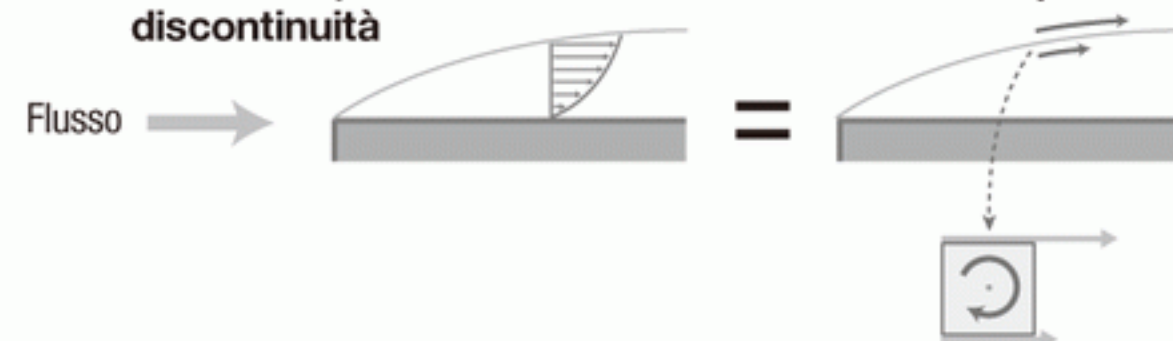
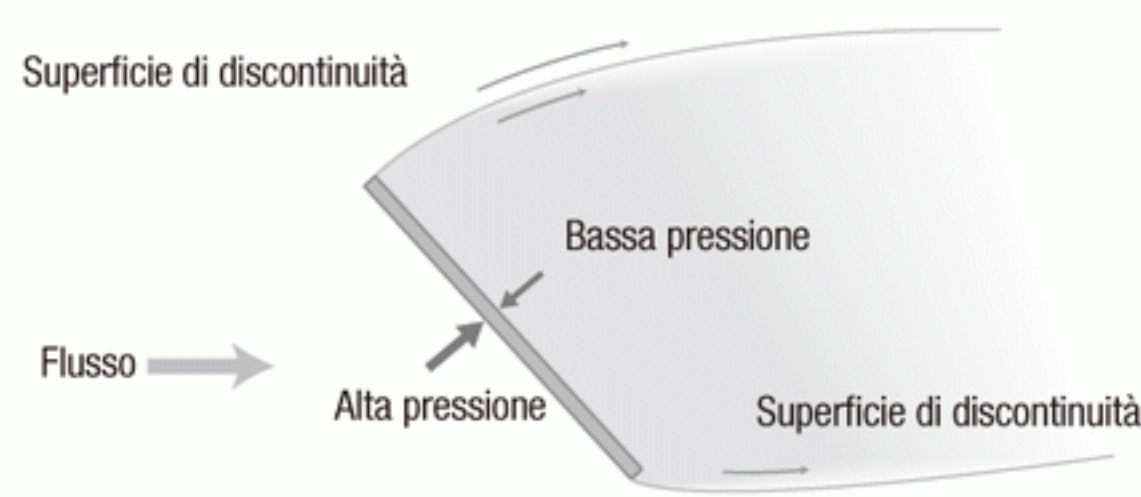
Figura 4-3-4 Applicazione del concetto di filamento vorticoso (strato vorticoso) alla velocità di flusso della superficie di discontinuità

Flusso
=
Lo strato limite può essere considerato parte della velocità di flusso per la superficie di discontinuità.

Figura 4-3-5 Schema concettuale di un campo di flusso attorno a un piano piatto piano (superficie). Se si assume che le superfici di discontinuità dei bordi anteriore e posteriore di un piano piatto esistano, allora il paradosso di d'Alembert non entra in gioco.

Superficie di discontinuità
Bassa pressione
Flusso
Alta pressione
Superficie di discontinuità

4-4 Teorema di Kutta-Žukovskij

▶ Teoria della circolazione della portanza

Kirchhoff e Rayleigh hanno elaborato l'ipotesi che prevede che la superficie di discontinuità si formi attorno agli angoli acuti. Detto questo, tale superficie di discontinuità può formarsi ovunque sulla superficie di un oggetto. Si può anche osservare che la superficie di un oggetto è ricoperta da strati vorticosi. In realtà, la teoria della portanza è significativamente collegata alla teoria della circolazione della portanza.

Teorema di Kutta-Žukovskij

La velocità di flusso muta in modo notevole a causa della viscosità, sulla superficie di un oggetto, generando così filamenti vorticosi che divengono strati vorticosi e avvolgono la superficie del citato oggetto. L'intensità di questi strati vorticosi che ricoprono la superficie dell'oggetto viene definita "circolazione". Partendo da tali premesse, il flusso attorno al perimetro del materiale può essere separato in due flussi artificiali: uno è il flusso uniforme, l'altro il flusso di circolazione (da una diversa prospettiva, la circolazione è la quantità derivata integrando la velocità di flusso lungo una qualsiasi curva chiusa orizzontale).

Come discusso nel paragrafo precedente, in base all'esistenza di un flusso uniforme e di un flusso di circolazione, consideriamo un flusso nel quale i due tipi siano presenti simultaneamente e vadano a sovrapporsi. In questo esempio, la parte superiore del flusso di circolazione fluisce nella stessa direzione del flusso uniforme, quindi la velocità di flusso superiore aumenta. D'altro canto, il flusso di circolazione inferiore fluisce nella direzione opposta al flusso uniforme, per cui quando i due vanno a sovrapporsi la velocità di flusso cala. Come risultato, in base alla teoria di Bernoulli, la pressione cala nella parte superiore e aumenta nella parte bassa del flusso di circolazione, generando così una spinta verso l'alto (figura 4-4-1).

Questo modello in realtà richiama il campo di flusso attorno a un profilo alare. Il profilo alare viene fatto corrispondere all'aumento della velocità di flusso sulla superficie superiore, cosa che riduce la pressione, e alla riduzione della velocità di flusso sulla superficie posteriore, con aumento della pressione. Il campo di flusso attorno al profilo alare può essere considerato come una sovrapposizione del flusso uniforme e del flusso di circolazione e, in presenza di circolazione, la portanza può essere calcolata utilizzando l'equazione seguente (figura 4-4-2).

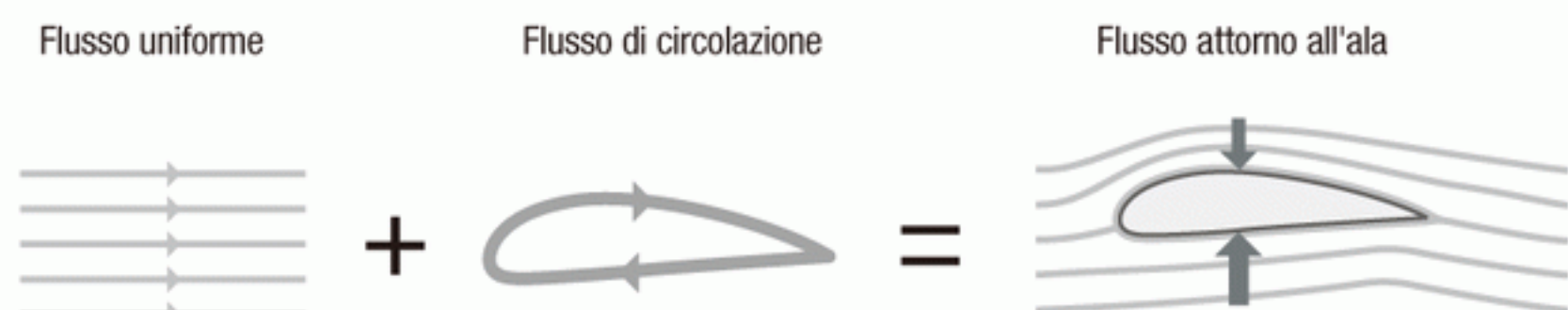
Portanza = Densità di flusso x Velocità del flusso uniforme x Circolazione vorticosa ($L=\rho V\Gamma$)

Questa teoria è stata introdotta in modo indipendente da Martin Wilhelm Kutta e Nikolai Žukovskij e viene pertanto definita teoria di Kutta-Žukovskij. La teoria ci dice che, a prescindere da sagoma e dimensione di un oggetto, in presenza di circolazione è possibile generare la portanza da esso generata.

Figura 4-4-1 Campo di flusso con flusso uniforme e flusso di circolazione sovrapposti

Flusso uniforme + Flusso di circolazione =

Figura 4-4-2 Il campo di flusso attorno a un profilo alare si può considerare una combinazione del flusso uniforme e del flusso di circolazione

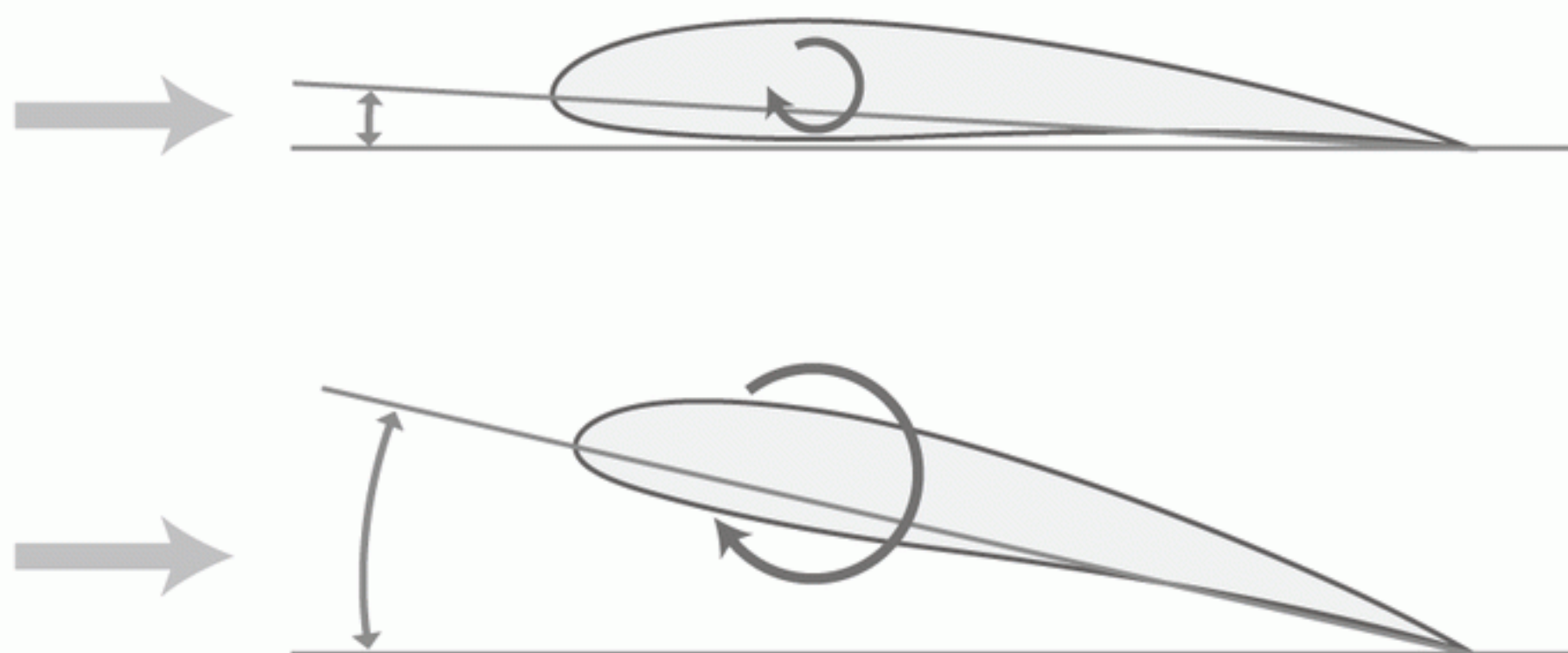
Flusso uniforme + Flusso di circolazione = Flusso attorno all'ala

Condizione di Kutta

Grazie al teorema di Kutta-Žukovskij, abbiamo scoperto che la portanza di un oggetto può essere calcolata quando è nota la circolazione attorno all'oggetto stesso. Per applicare questa teoria a un profilo alare, però, è necessario considerare un fattore. In generale, l'equazione del fluido è basata sul concetto che il flusso sia ordinato e che, nel caso l'oggetto sia affilato oppure il flusso sia discontinuo, sia necessario attuare considerazioni particolari.

Quando un profilo alare viene preso come esempio, il limite posteriore del profilo alare è affilato. Quindi, a meno che il flusso sopra e sotto il profilo alare convergano senza discontinuità al limite posteriore, il teorema di Kutta-Žukovskij non può essere applicato a un profilo alare. Questa condizione necessaria, nella quale il flusso superiore e inferiore devono confluire senza discontinuità, è definita condizione di Kutta. Applicando la condizione di Kutta, è possibile determinare la circolazione e procedere matematicamente al calcolo della portanza.

Se un'ala viene inclinata con un certo angolo d'attacco contro il flusso, maggiore è questo angolo e più ampia è la circolazione richiesta perché la condizione di Kutta venga rispettata. Quindi, maggiore è l'angolo d'attacco, maggiore è la circolazione, maggiore è la portanza generata.

Figura 4-4-3 **Condizione di Kutta e circolazione**

Condizione di Kutta: il flusso sulle parti superiore e inferiore dell'ala converge al limite posteriore in modo uniforme e alla medesima velocità.

Maggiore è l'angolo d'attacco, maggiore è la circolazione necessaria perché la condizione di Kutta venga rispettata.

4-5 Teoria dello strato limite di Prandtl

▶ L'attrito riguarda solo la prossimità della superficie di un oggetto

Anche se il calcolo della resistenza da parte di Kirchhoff e Rayleigh non andò a buon fine, i due erano sulla strada giusta. Ora introdurremo la teoria dello strato limite di Prandtl, che ha infine permesso di risolvere il paradosso di d'Alembert.

Teoria dello strato limite di Prandtl

Per stimare in modo corretto la resistenza, occorre conoscere la pressione e il modo in cui viene gestito l'attrito. Per comprendere l'attrito, è necessario conoscere la condizione di flusso sulla superficie dell'oggetto. Per riuscire a calcolare correttamente l'attrito, però, rimane da rispondere a una domanda: può un fluido aderire completamente alla superficie di un oggetto, quando la velocità del fluido è pari a zero, oppure scorre lungo la superficie a una data velocità?

Ludwig Prandtl affrontò questo difficile problema applicando per primo il concetto di strato limite. Egli scoprì che gli effetti della viscosità facevano scendere a zero la velocità di flusso sulla superficie di un oggetto: gli effetti dell'attrito erano presenti solo nelle vicinanze della superficie dell'oggetto. Al di fuori di tale strato limite, il flusso non è affetto dalla viscosità e si può definire fluido non viscoso. L'area nelle vicinanze della superficie dell'oggetto che è affetta dalla viscosità è nota come strato limite.

Nel 1904, Prandtl pubblicò un breve studio di otto pagine intitolato "Flussigkeitsbewegung Bei Sehr Kleiner Reibung" (Flusso di un fluido in condizioni di attrito minimo), nel quale introdusse per la prima volta il concetto di strato limite. Applicò l'equazione di Navier-Stokes esclusivamente a un particolare flusso nello strato limite: questo portò all'elaborazione dell'equazione dello strato limite, vale a dire una semplice derivata dell'equazione di Navier-Stokes. Quest'equazione era molto più facile da gestire dell'equazione di Navier-Stokes completa e consentiva di procedere a un calcolo più logico e accurato della portanza.

La teoria dello strato limite ha anche aiutato a stimare in modo più accurato il punto di distacco del flusso. Grazie a queste scoperte, il paradosso di d'Alembert venne finalmente risolto utilizzando la teoria dello strato limite di Prandtl. Lo studio del 1904 di Prandtl ampliava le prospettive della meccanica dei fluidi ed è ancora oggi considerato uno dei documenti più importanti in questo campo.

Figura 4-5-1 **Distribuzione della velocità sullo strato limite di un profilo alare. Il campo dello strato limite viene definito come inferiore al 99% della velocità del fluido al di fuori della vicinanza alla superficie dell'oggetto.**

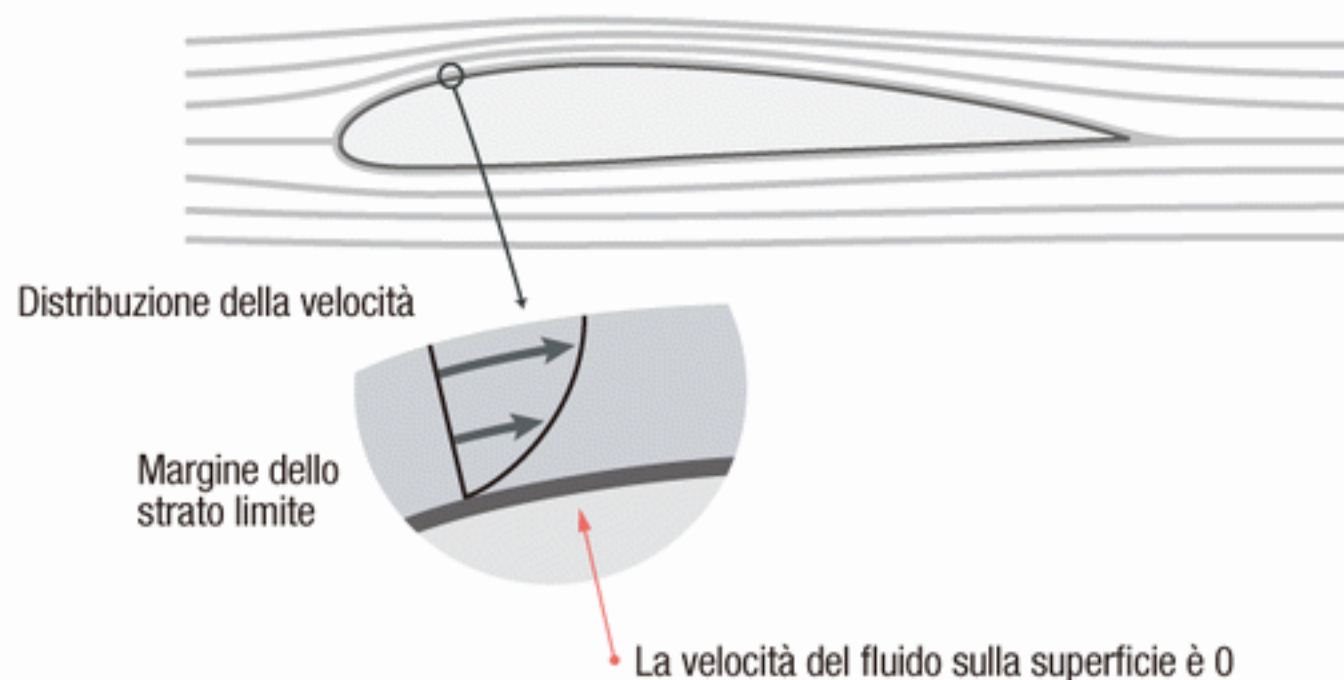



Figura 4-5-2 **Punto di distacco di una superficie aerodinamica e distribuzione della velocità nello strato limite**

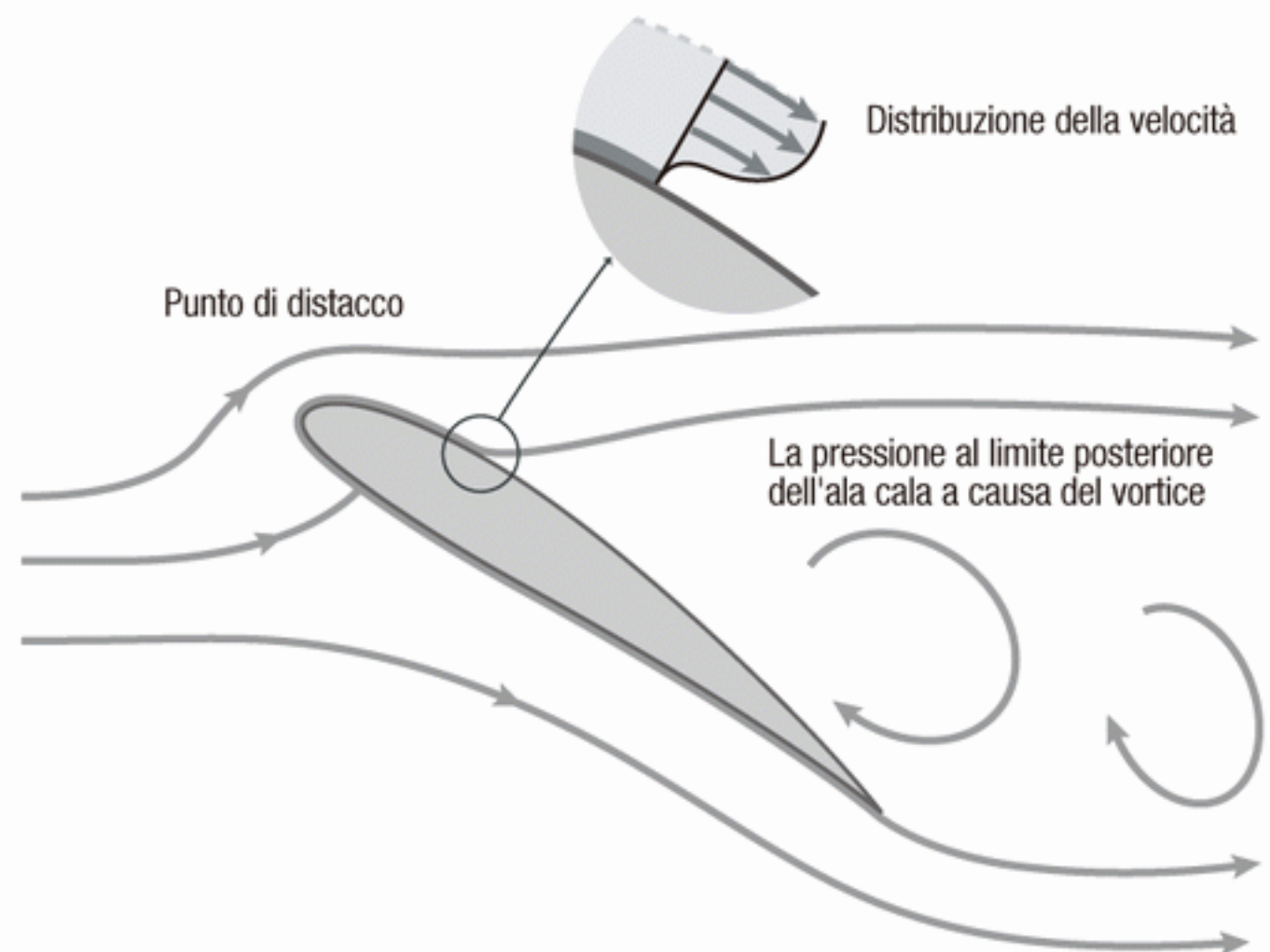



Figura 4-5-3 **Un veicolo che si sposta sulla terraferma è influenzato in modo notevole dal terreno, per quanto riguarda l'aerodinamica. In un ambiente esterno naturale uno strato limite non potrebbe esistere, nelle vicinanze della superficie sotto il veicolo: nell'ambito di un test nella galleria del vento, però, gli strati limite si formano lungo le pareti della galleria. La velocità di flusso è ridotta nello strato limite e, come risultato, esso blocca il passaggio del flusso sotto il veicolo. Questo crea un campo di flusso completamente diverso nella galleria, rispetto a quello presente in un ambiente aperto. Per le auto da competizione, attentamente progettate per creare deportanza fra il fondo della vettura e il terreno, questa differenza nel campo di flusso si è configurata come un problema serio. Per risolverlo, è stato introdotto un nastro mobile nella galleria del vento, per simulare la superficie stradale dell'ambiente esterno. Questo nastro mobile non solo aiuta a replicare il movimento di rotazione delle gomme, ma impedisce anche la formazione di uno strato limite sotto il veicolo presente nella galleria del vento.**

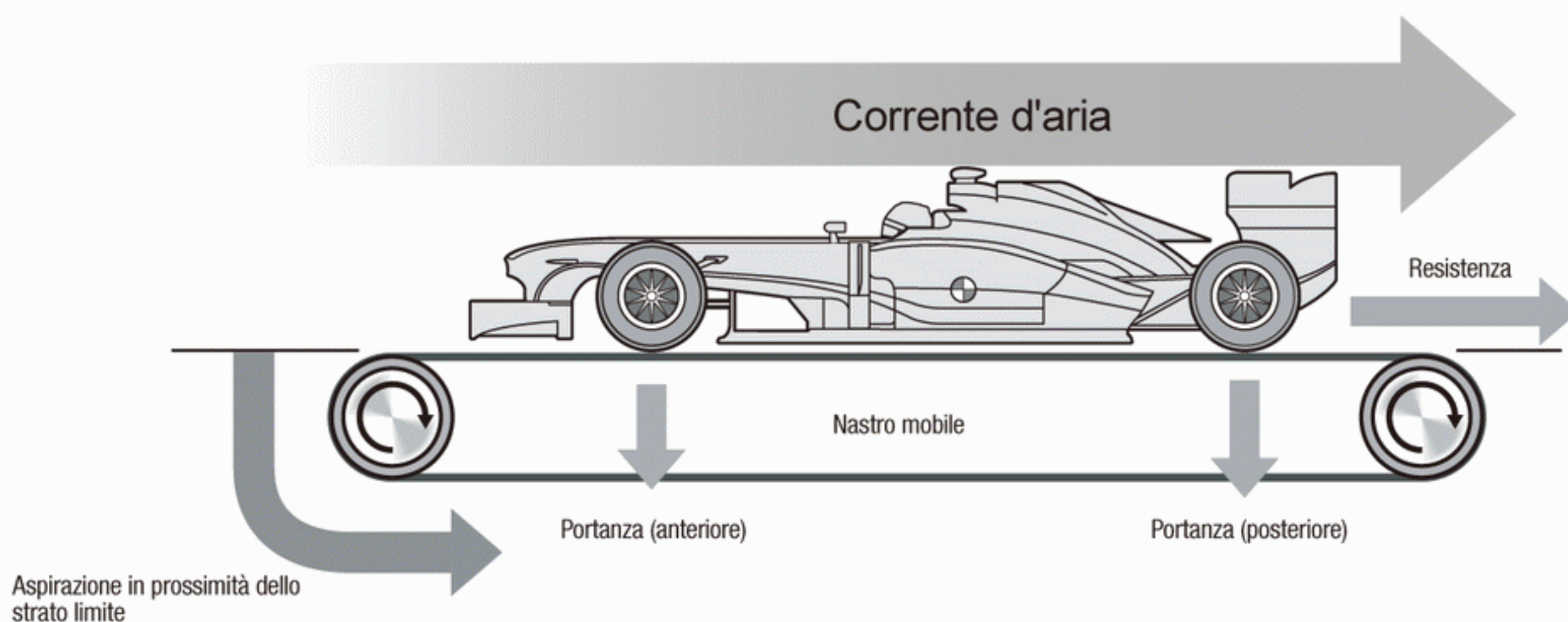
Corrente d'aria

Resistenza

Nastro mobile

Portanza (anteriore)

Portanza (posteriore)

Aspirazione in prossimità dello strato limite

SUGGERIMENTI Inizialmente, Prandtl ha utilizzato due espressioni per descrivere il concetto elaborato. Una era "strato limite", mentre la seconda era "strato di transizione", che era in realtà quella utilizzata con maggiore frequenza. I suoi allievi, però, preferivano utilizzare l'espressione "strato limite" e fu così questa a entrare nell'uso comune.

SUGGERIMENTI Il contributo di Prandtl alla meccanica dei fluidi è stato di importanza fondamentale. Oltre alla teoria dello strato limite, Prandtl ha introdotto anche la teoria della linea portante, l'ipotesi della lunghezza di mescolamento e la teoria dell'onda d'urto supersonica, divenuti tutte principi fondamentali della moderna meccanica dei fluidi. Inoltre, le lezioni di Prandtl hanno prodotto allievi di livello assoluto come Blasius, Karman e Munk, a loro volta divenuti importanti studiosi nel campo della meccanica dei fluidi.

4-6 Teoria della linea portante di Prandtl

▶ Generazione di vortice all'estremità alare su ali finite

Grazie a Kutta e Žukovskij, la teoria della circolazione della portanza era venuta alla luce ed era divenuto possibile calcolare in modo preciso la portanza generata da un flusso bidimensionale. Nella realtà, però, ali e flussi sono tridimensionali, per cui il flusso bidimensionale non poteva essere applicato direttamente. Era necessario sviluppare una nuova teoria della portanza in un campo di flusso tridimensionale.

Flusso attorno a un'apertura alare finita

Come spiegato in precedenza, un profilo alare è un'ala con un'apertura alare infinita. Un'ala con apertura alare infinita ha una circolazione identica in ogni punto dell'ala esaminato e una portanza sempre costante. Per questo, la teoria di Kutta-Žukovskij può essere applicata direttamente solo a un'ala con apertura alare infinita.

Detto questo, un'ala reale ha apertura alare finita. Al margine dell'ala, il flusso cercherà di passare dalla sua parte inferiore, dove la pressione è elevata, a quella superiore, dove la pressione è ridotta. Per questo motivo, la distribuzione della pressione sulla superficie di un'ala con apertura alare finita è diversa da quella che si ha su un modello con apertura alare infinita e la portanza cala man mano che ci si avvicina all'estremità dell'ala. Il flusso circola dal lato a pressione elevata a quello a pressione ridotta, causando un vortice verticale mentre procede verso il basso. Tale vortice, in quanto generato all'estremità alare, si definisce vortice di estremità alare.

Figura 4-6-1 Flusso attorno all'ala con apertura alare finita

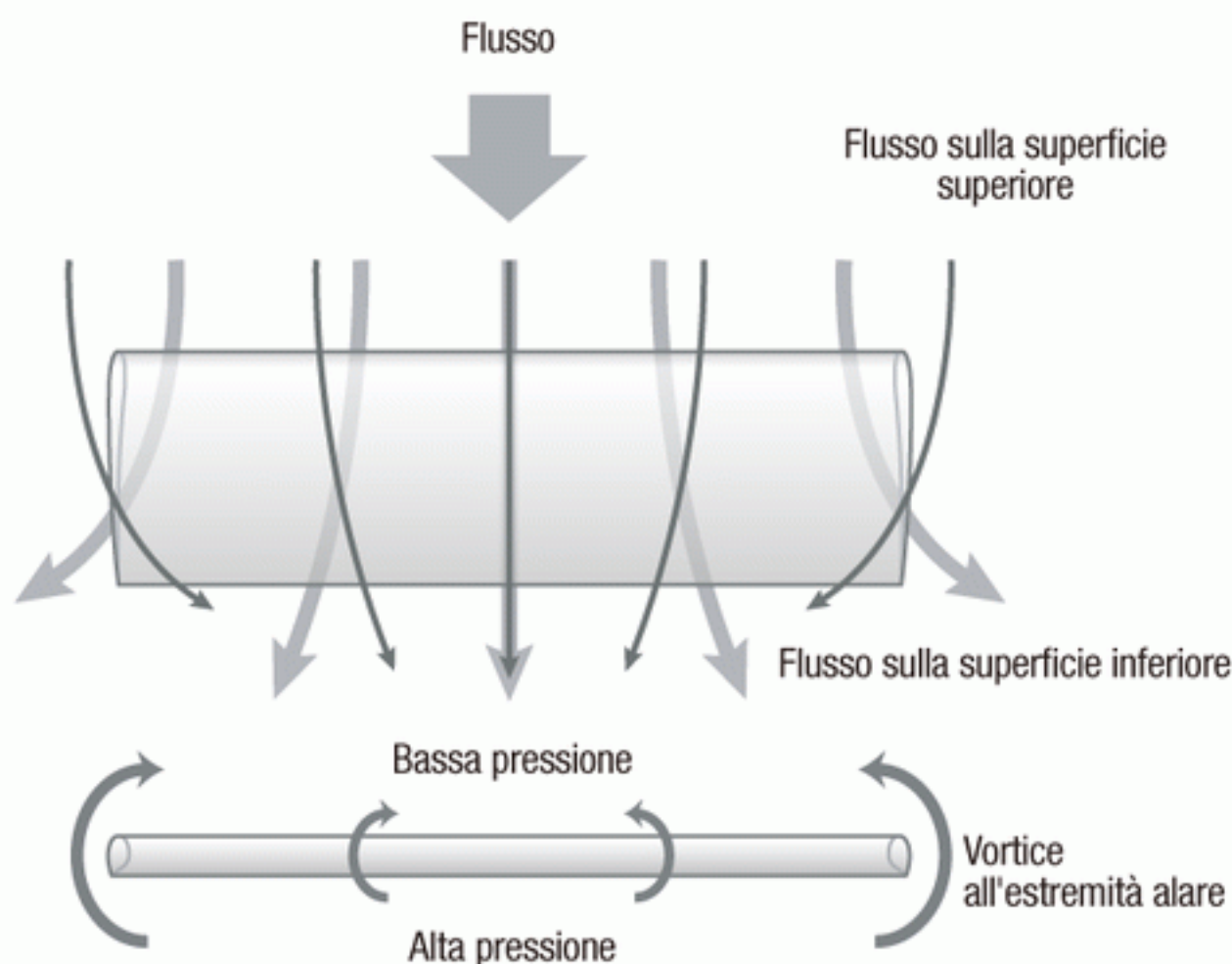



Figura 4-6-2 Circolazione e portanza di ali con apertura alare infinita e finita

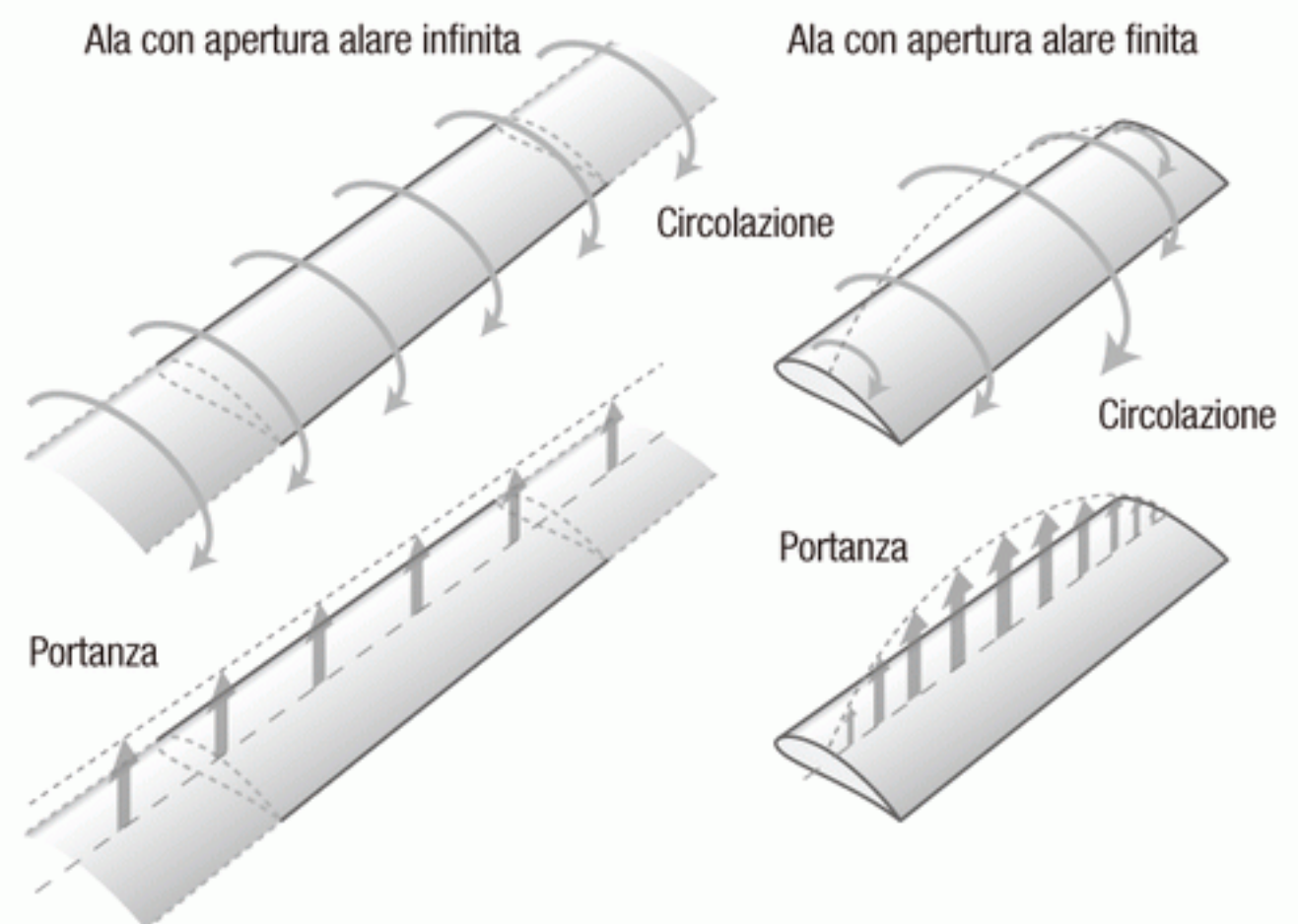



Figura 4-6-3 Vortice all'estremità alare

Teoria della linea portante di Prandtl

Un inglese di nome Frederick Lanchester realizzò un modello del flusso attorno a un'ala con apertura alare finita, utilizzando il concetto di filamento vorticoso di Helmholtz. Diede per assodato che la circolazione si creasse attorno all'ala tramite dei filamenti vorticosi e che questi ultimi piegassero verso la parte inferiore del flusso all'estremità alare, creando una nuova circolazione. Egli riteneva che il flusso attorno a un'ala dall'apertura alare finita fosse composto da un "flusso uniforme verso l'alto", uno strato di vortici parallelo all'estremità alare" e "un flusso di filamenti vorticosi che procede verso il basso dall'estremità alare". Combinando questi elementi di flusso, Lanchester credeva di poter derivare la portanza di un'ala con apertura alare finita. Non riuscì, però, a fornire un'espressione matematica precisa della propria teoria, che non venne quindi accettata dalla comunità accademica del periodo.

La teoria per un'ala dall'apertura alare finita venne completata da Prandtl, che si era già occupato della teoria dello strato limite. La teoria della portanza per un'ala con apertura alare finita elaborata da Prandtl era molto simile al modello di Lanchester, ma egli riuscì a sostenerla con una valida dimostrazione matematica.

Il modello di Prandtl si basava su filamenti vorticosi di debolezza infinita, collegati fra loro in quantità infinita e posizionati sulla superficie alare, dove piegavano verso il basso. Questi filamenti vorticosi vengono definiti linee portanti.

La teoria della linea portante di Prandtl ha permesso di calcolare la portanza e la coppia che possono essere generate da un'ala con apertura alare finita. Essa permise anche di confermare l'esistenza della resistenza indotta, generata dal movimento verso il basso creato dal vortice all'estremità alare. Questo fu di aiuto per dimostrare teoricamente che la resistenza indotta cala quando l'apertura alare (rapporto d'aspetto) di un'ala aumenta.

SUGGERIMENTI Un vertice di estremità alare, come illustrato nella figura 4-6-3, si verifica quando l'alta pressione sotto l'ala crea un flusso che procede verso l'alto, in direzione della superficie superiore dell'ala, dove la pressione è più bassa. Perché il vertice di estremità alare venga generato, deve essere continuamente presente una fonte di energia. Se quest'energia proviene da un propulsore, significa che si verifica uno spreco tramite consumo di carburante. Nella realtà, il movimento verso il basso e il vortice di estremità alare influenzano il campo di pressione dell'ala, generando della resistenza indotta. Dato che questa è una resistenza causata dal flusso indotto dalla portanza, viene definita "resistenza indotta". Prandtl ha indicato che il vortice di estremità alare riduce la portanza: questo avviene perché il movimento verso il basso derivante dal vortice riduce l'effetto dell'angolo d'attacco. Il vertice di estremità alare è stato scoperto originariamente da Lanchester (figura 4-6-5).

Figura 4-6-4 Schema concettuale della teoria della linea portante

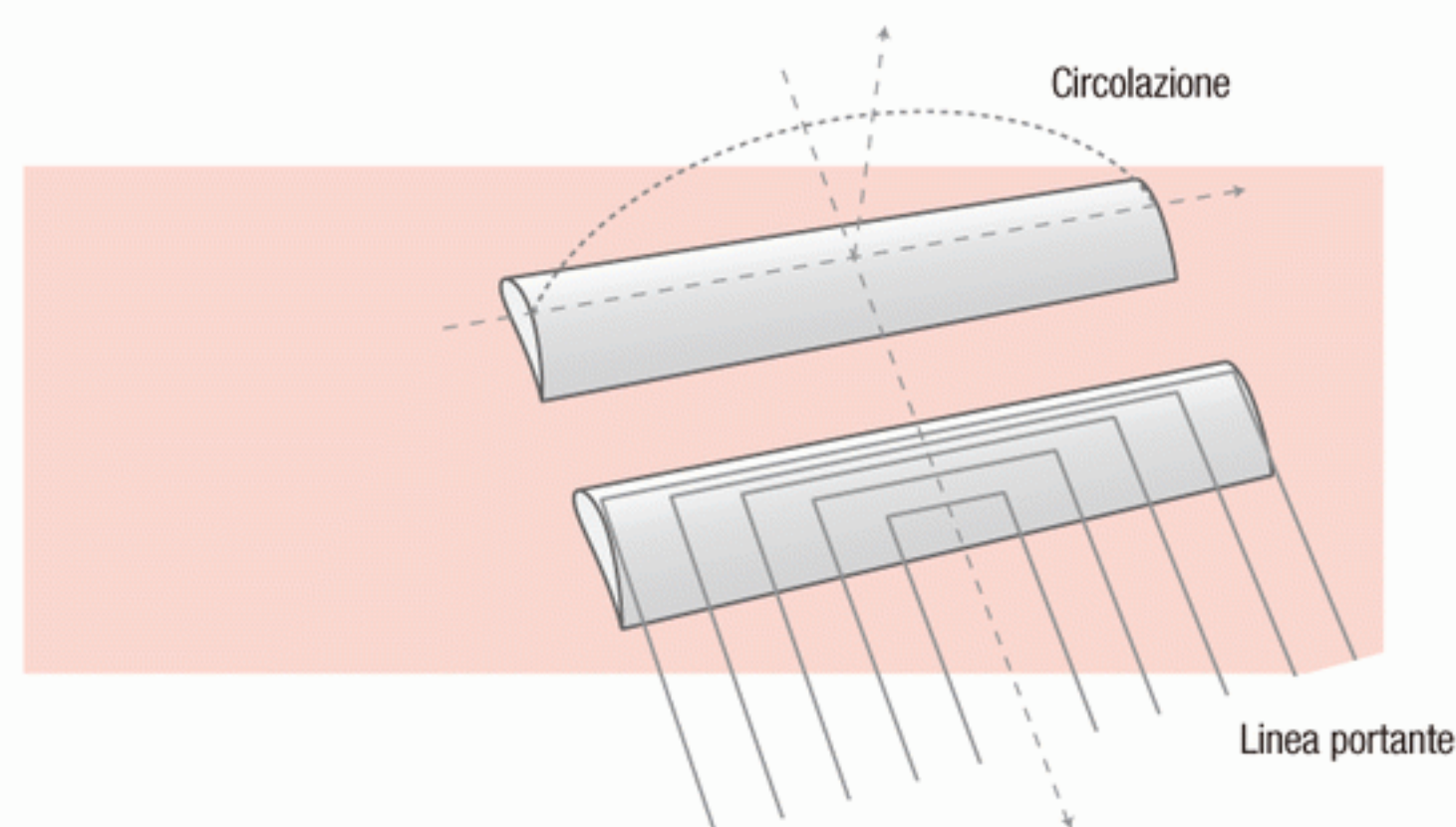



Figura 4-6-5 Illustrazione di Lanchester dei vortici attorno all'ala

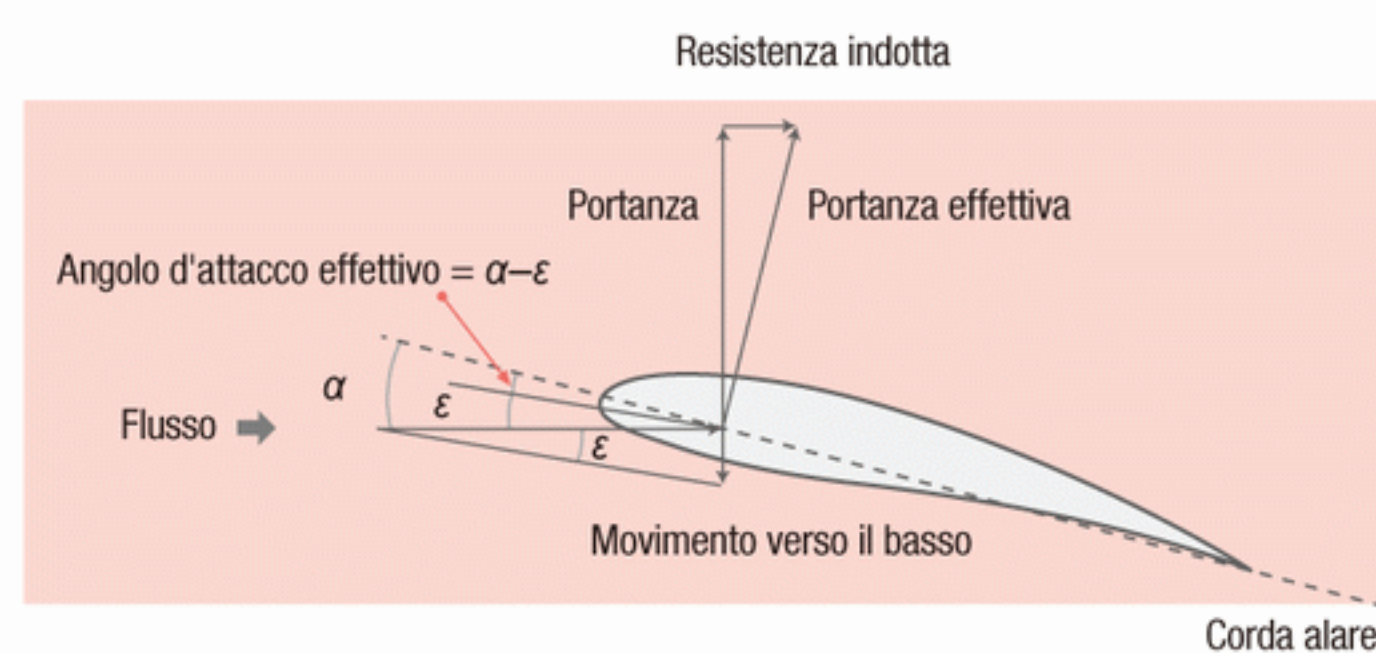
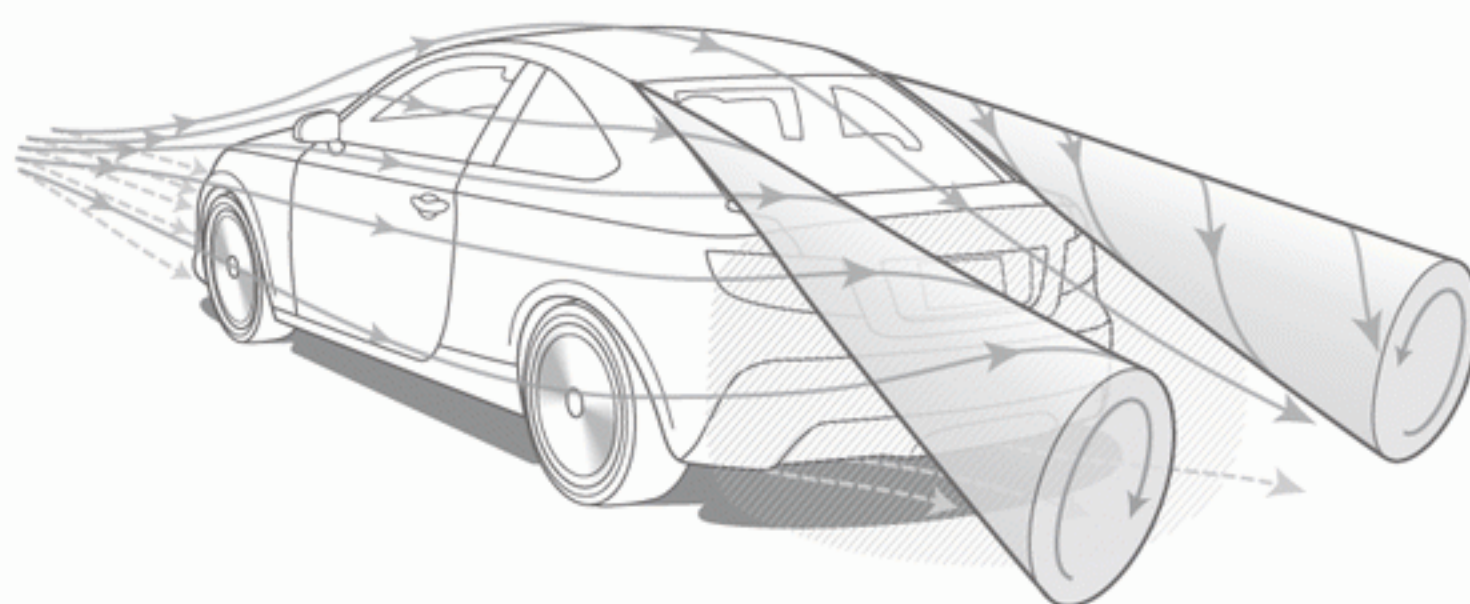



Figura 4-6-6 Vortice longitudinale generato dal telaio di una vettura

5 Il mondo della CFD

1 ▶ CFD: l'ambito della discretizzazione

L'introduzione ai concetti della teoria dell'aerodinamica, nella sezione precedente, dovrebbe aver chiarito che, per comprendere in modo approfondito il concetto di campo di flusso, però, è necessario risolvere equazioni dei fluidi, come l'equazione di Navier-Stokes. Notevoli progressi nel campo della risoluzione numerica delle equazioni tramite l'uso di computer si sono concretizzati negli ultimi anni del 20° secolo.

Questo è il campo della "fluidodinamica computazionale" (o dinamica numerica dei flussi), spesso identificata come CFD. La CFD svolge un ruolo essenziale nello sviluppo automobilistico da diversi anni a questa parte, ma non è particolarmente nota al grande pubblico. Per comprendere le basi del funzionamento della CFD, esaminiamo brevemente i suoi concetti teorici.

Approssimazione

Il mondo reale è analogico. Un modo per considerare il tutto è vederlo come un mezzo continuo, in modo che a ogni singolo punto in un continuo spazio-temporale infinitamente esteso corrispondano grandezze fisici di un qualche tipo. Anche nella dinamica dei flussi teorica, il flusso viene sostanzialmente considerato come un continuo uniforme in costante evoluzione. D'altro canto, i computer sono digitali, per cui possono gestire solamente valori discreti, nonché contenere informazioni limitate. Per questo motivo, la CFD suddivide il continuo uniforme dello spazio e del tempo discretizzandolo. Occorre però ricordare che lo scopo della CFD è approssimare nel miglior modo possibile il continuo uniforme del mondo reale. Perché ciò sia possibile, le informazioni non presenti nei computer devono essere modellate e integrate.

Ma come si possono integrare queste informazioni mancanti? Lo si può fare semplicemente collegando le informazioni presenti nel computer con una linea retta, trattando quindi i dati mancanti come elementi di modifica su tale retta. Oppure possiamo integrare usando un modello di linea curva, che mostra i cambiamenti come una curva dove le informazioni possono essere mancanti. Questo procedimento, che consente di semplificare le informazioni senza perderne le proprietà originali, si definisce "approssimazione", mentre il processo per ottenere un valore simile all'originale tramite quest'approssimazione si definisce "valore approssimato". Nella CFD, l'approssimazione appena enunciata si definisce "schema".

Figura 5-1-1 La differenza fra il mondo reale e il mondo della CFD

Figura 5-1-2 Integrare i dati mancanti dei computer

Il teorema dell'equivalenza di Lax

Dato che i computer non sono in grado di contenere informazioni su tutto il tempo e lo spazio esistenti nel mondo reale, i risultati dei calcoli ottenuti tramite la CFD sono sempre dei valori approssimati. Se la differenza rispetto al valore reale è sufficientemente limitata, però, da un punto di vista pratico non si verifica alcun problema. Per esempio, quando la velocità di flusso media in un campo di flusso è 30 m/s, non ha alcun senso pratico considerare valori decimali nell'ordine di 0,000001. Una persona intenta ad analizzare dei flussi di 30 m/s e di 30,000001 m/s li considererebbe virtualmente identici. Per questo motivo, tali minimi valori si possono ignorare e, per lo stesso motivo, se il risultato di una simulazione genera differenze di questa entità, la cosa non è fonte di preoccupazione. Per esprimere il tutto in termini tecnici, il risultato del calcolo della simulazione è considerato accettabile fino a quando è in grado di "convergere" al valore reale.

Ora andremo a introdurre un teorema importante, conosciuto come "teorema dell'equivalenza di Lax", dimostrato da Peter Lax. Questo teorema afferma che "l'unico schema in grado di convergere è uno schema che si conforma stabilmente". In altre parole, il rapporto di [stabilità + conformabilità = convergenza] è il teorema dell'equivalenza di Lax. Osserva la figura 5-1-4 per comprendere il significato di "conformabilità", "stabilità" e "convergenza".

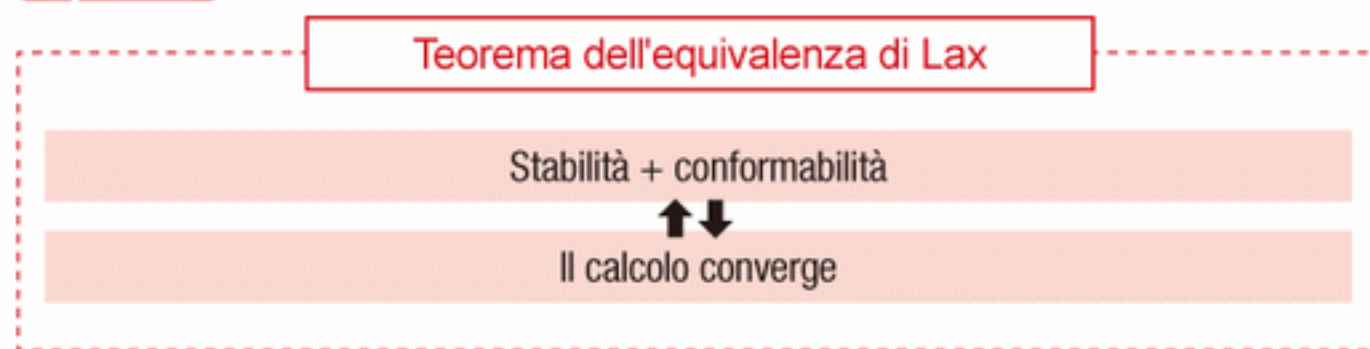
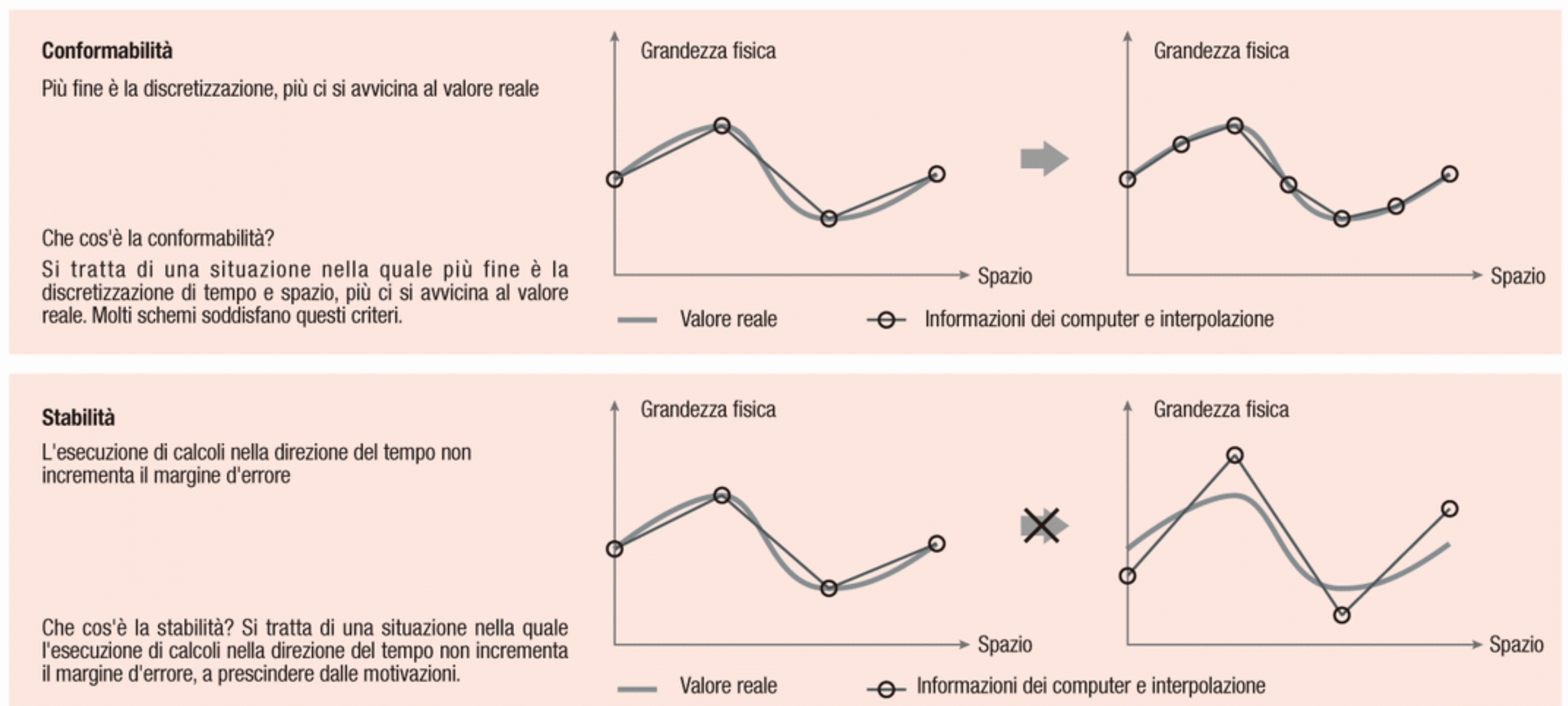
Figura 5-1-3

SUGGERIMENTI Il teorema dell'equivalenza di Lax afferma che le equazioni evolutive lineare e scalare rispettano i criteri di stabilità e di conformabilità per la convergenza, attraverso l'equazione alle differenze. In altre parole, quando si raggiunge la convergenza e gli incrementi del reticolo sono fitti, la soluzione differenziale ritorna alla sua equazione differenziale originaria.

Figura 5-1-4 **Conformabilità e stabilità. Il "valore reale" a cui si fa riferimento è la soluzione ottenuta con la risoluzione analitica di equazioni differenziali parziali del fluido.**

5 2 Metodo del volume finito

▶ La tecnica più utilizzata per la simulazione dei fluidi

Anche se sono state elaborate molte tecniche per la simulazione dei fluidi, ora presenteremo quella più diffusa, definita "metodo del volume finito".

Concetto del metodo del volume finito

Il metodo del volume finito pone l'accento sull'equilibrio del volume che fluisce in entrata e in uscita in ogni elemento spaziale diviso. Per esempio, considera il volume dell'acqua che entra ed esce da un contenitore: per calcolare quant'acqua si trova in quel contenitore dopo un secondo, si può utilizzare la seguente equazione:

Volume in un contenitore dopo 1 secondo = Volume originale + Flusso in entrata al secondo - Flusso in uscita al secondo

L'idea alla base del metodo del volume finito è concettualmente simile alla tecnica per predire un futuro valore del volume d'acqua, utilizzando il volume attuale dell'acqua e il volume dell'acqua in entrata e in uscita. La tecnica per calcolare il volume di un fluido in una simulazione si può applicare anche a grandezze fisiche, come pressione e velocità del flusso.

SUGGERIMENTI L'approssimazione (schema) utilizzata per il metodo della differenza e il metodo del volume finito fa affidamento sull'espansione di Taylor. L'espansione di Taylor è una tecnica che rappresenta una funzione liscia attraverso una serie di espansioni. Anche se l'espansione di Taylor non viene descritta in queste pagine, è molto importante nell'ambito di diverse operazioni matematiche, CFD compresa. Ti consigliamo pertanto di approfondire l'argomento.

Figura 5-2-1 Concetto del metodo del volume finito

← Flusso in entrata

← Volume accumulato

← Flusso in uscita

Per predire quant'acqua vi sarà nel contenitore, tutto ciò che bisogna fare è tenere sotto controllo l'equilibrio fra l'acqua che entra e quella che esce. Questa è la visuale di base del metodo del volume finito. Occorre notare che il volume che entra e quello che esce non può essere definito esattamente e che è necessario procedere con una stima. Per questo, la precisione della stima influenza notevolmente quella della simulazione.

Flusso numerico

Osserviamo con maggior attenzione il concetto del metodo del volume finito attraverso la CFD. Per prima cosa, divideremo lo spazio come nella figura 5-2-2. Questo spazio diviso viene definito come "reticolo" (o maglia, o griglia). Consideriamo ora un flusso che fluisce attraverso il reticolo.

Per prima cosa, diamo per assodato di conoscere la grandezza fisica che ogni reticolo contiene in un determinato istante. Il concetto di simulazione dei fluidi tramite il metodo del volume finito si basa sulla previsione della grandezza fisica contenuta dagli elementi futuri, utilizzando la quantità in entrata e in uscita per ogni unità di tempo.

Quindi, come viene determinato il flusso in entrata e in uscita per ogni unità di tempo? Nella CFD la risposta si basa sulla misurazione (approssimando) di un valore ragionevole a partire dalle quantità in entrata e in uscita, basandosi sulla distribuzione della grandezza fisica attuale. C'è una certa libertà di scelta su come determinare la quantità, ma flusso in entrata e in uscita per unità di tempo non possono essere definiti in un unico modo. Così, il concetto di scelta umana per determinare la grandezza fisica di flusso in entrata e in uscita per ogni unità di tempo viene definito "flusso numerico" e la sua precisione ha un'influenza notevole sulla precisione dei risultati del calcolo.

Figura 5-2-2 **Flusso numerico in entrata e in uscita dall'elemento**

Futura grandezza fisica dell'elemento j = Grandezza fisica originaria dell'elemento j
+ Flusso numerico j - 1/2 flusso in entrata dell'elemento j
- Flusso numerico j + ½ flusso in uscita dell'elemento j

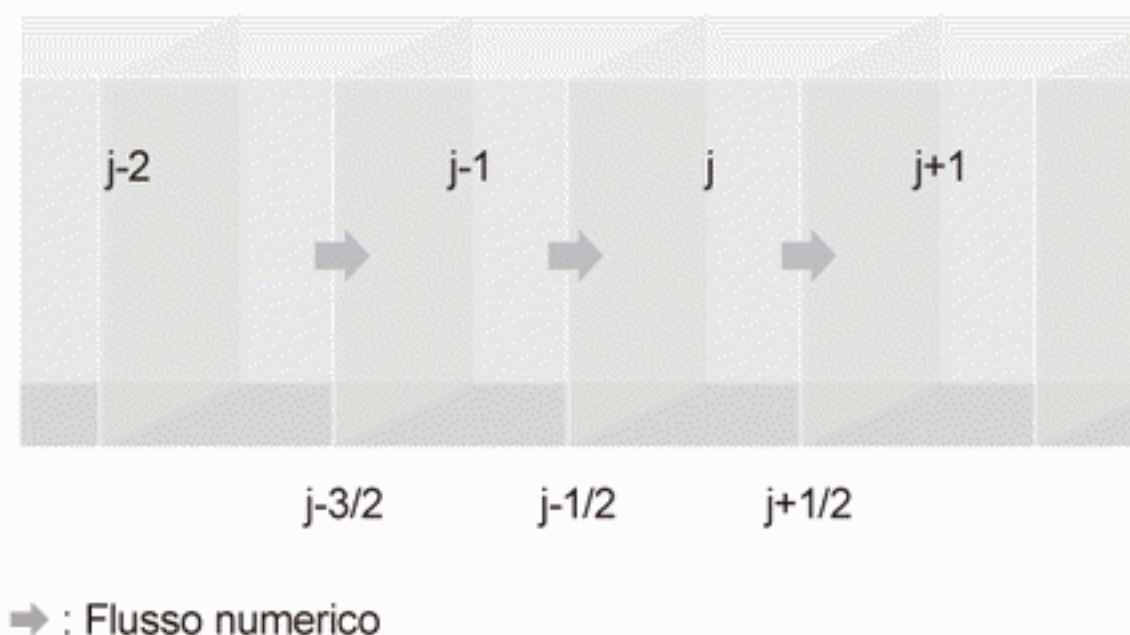
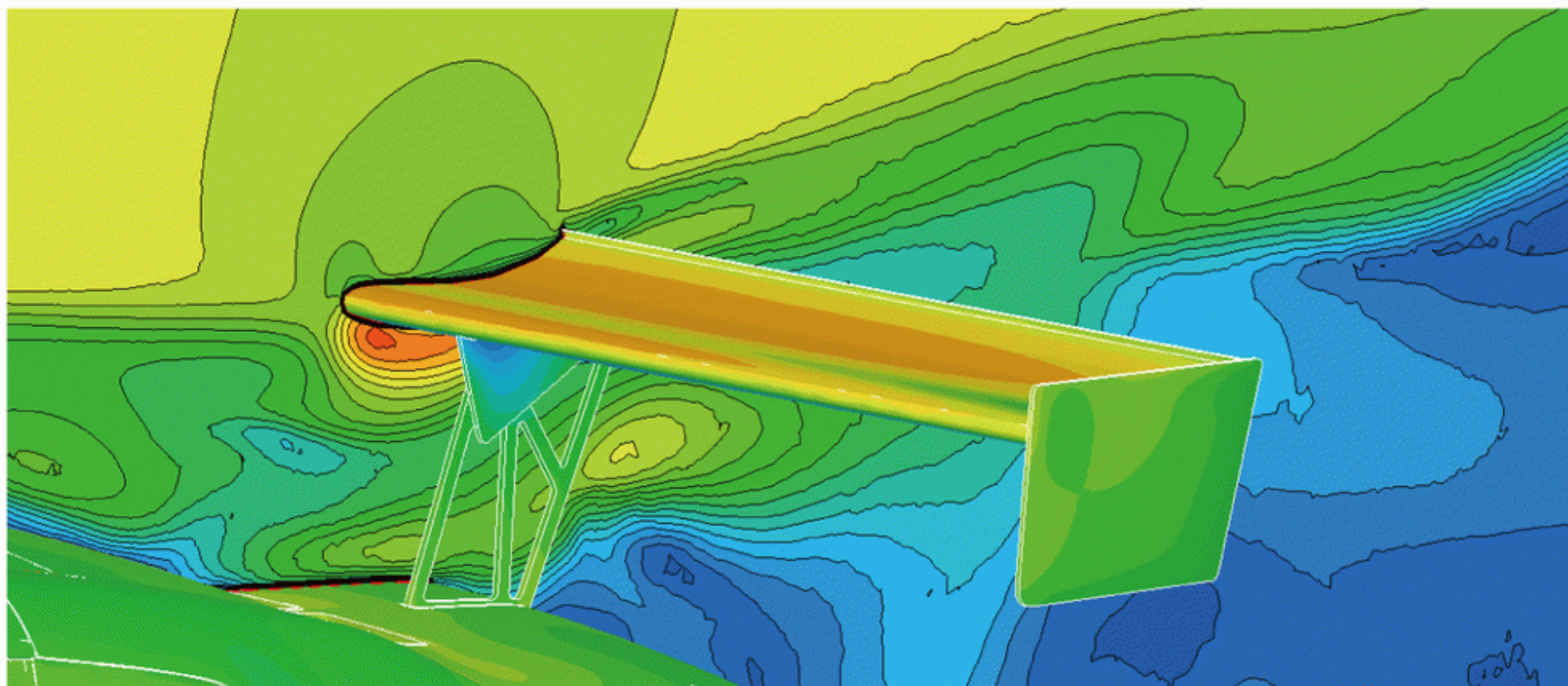



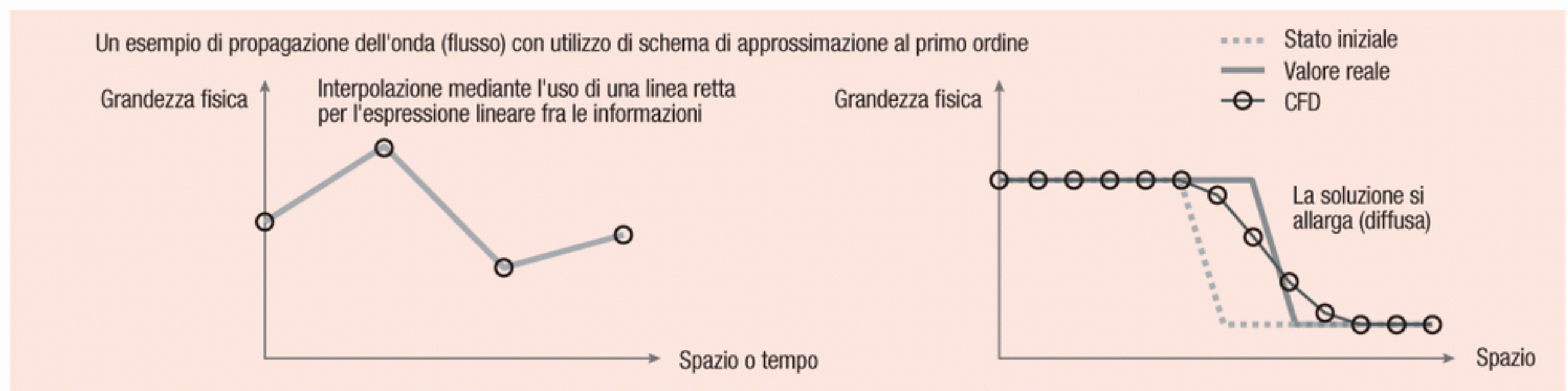
Figura 5-2-3 **Campo di flusso attorno all'ala posteriore di un'auto da corsa**

5-3 Caratteristiche dello schema

▶ Monotonicità e precisione elevata non sono compatibili

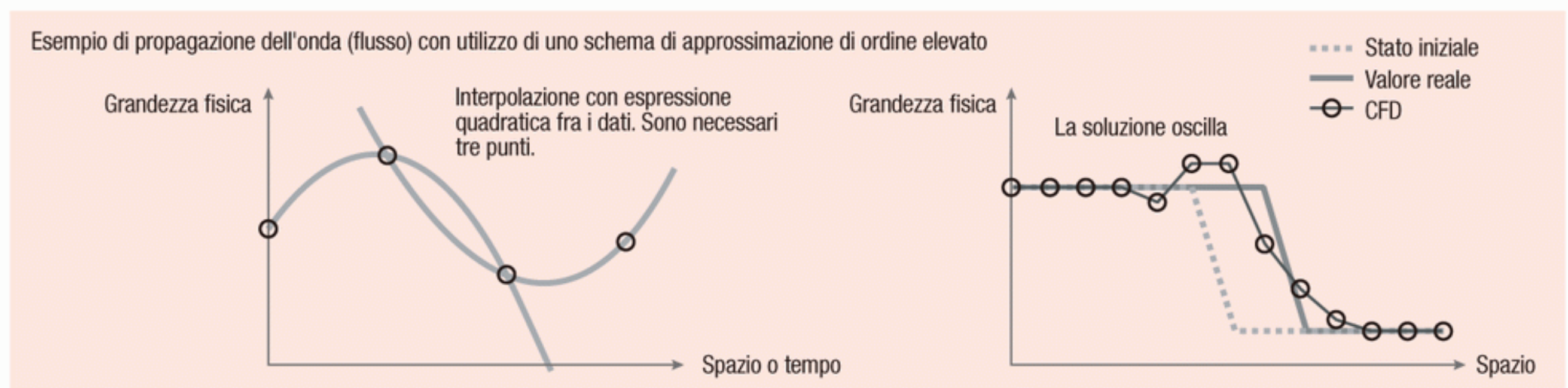
Esistono molti modi per determinare il flusso numerico e chi si occupa dell'esecuzione della CFD deve determinare lo schema appropriato. Ovviamente, non è possibile scegliere semplicemente lo schema preferito: la precisione del flusso numerico può variare in base al tipo di schema utilizzato e questo va a influenzare la precisione della simulazione. Come afferma il teorema dell'equivalenza di Lax, l'utilizzo di uno schema inappropriato aumenta il margine d'errore e conduce a calcoli imprecisi. Esaminiamo brevemente come la differenza dello schema può influenzare i risultati.

Lo schema dell'approssimazione primaria

Per integrare le informazioni mancanti di un computer, la prima cosa da fare è approssimare utilizzando una linea retta per rappresentare le modifiche nella grandezza fisica. Quando l'espressione lineare viene usata per approssimare il cambiamento lineare, la precisione di quello schema viene considerata come precisione primaria. Lo schema dell'approssimazione al primo ordine ha il vantaggio di poter mantenere la monotonicità, ma lo svantaggio di allargare la soluzione.

Figura 5-3-1 Esempio di calcolo della propagazione dell'onda e schema di approssimazione al primo ordine. La soluzione si allarga perché lo schema di approssimazione al primo ordine non può risolvere le onde ad alta frequenza.

Lo schema di precisione di ordine elevato

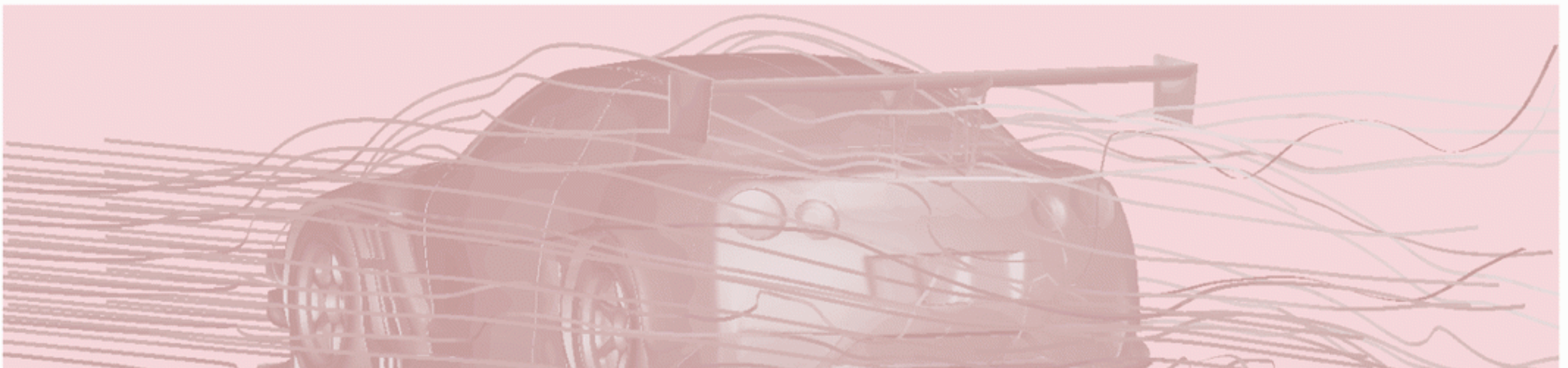
Si può pensare che sarebbe possibile ottenere un risultato più preciso ricavando delle informazioni (grandezza fisica) da più elementi del reticolo e creando un'approssimazione tramite curva di ordine elevato, invece di creare un'approssimazione da una retta. In effetti, la soluzione ottenuta con una precisione di ordine superiore è più elevata, rispetto a quella ottenibile con un normale schema di approssimazione al primo ordine. Comunque, più elevato è l'ordine, maggiore è la quantità fisica utilizzata per ricavare calcoli dai numerosi reticoli, andando così ad aumentare la complessità computazionale. Ci sono anche altri svantaggi, per esempio casi in cui un'approssimazione di ordine elevato potrebbe generare una soluzione oscillante, riducendo così la precisione.

Figura 5-3-2 Esempio di calcolo di uno schema di approssimazione al secondo ordine e di propagazione dell'onda (flusso). La forma d'onda è spezzata perché l'onda con precisione di ordine elevato è diversa dalla velocità (fase) della propagazione dell'onda dalla frequenza.

Teorema di Godunov

Si può ottenere un calcolo più preciso per la maggior parte dei campi di flusso utilizzando lo schema di approssimazione a un ordine elevato. Questo schema, però, presenta degli svantaggi. Quando si usa uno schema di approssimazione a un ordine elevato su aree dove possono verificarsi mutamenti improvvisi del flusso, come un flusso su una superficie di discontinuità, la soluzione risulta suscettibile a variazioni che possono generare valori non realistici e privi di stabilità. In questo genere di campo di flusso, lo schema di approssimazione per primo ordine, in grado di mantenere la monotonicità, fornisce risultati migliori.

Perché, quindi, non realizzare uno schema dalla precisione elevata, le cui soluzioni non siano soggette a oscillazioni? Purtroppo, è stato matematicamente dimostrato che le due proprietà (precisione elevata e soluzione monotona) non sono compatibili in uno schema. Questo si definisce "teorema di Godunov". Secondo il teorema di Godunov, non esiste alcuno schema in grado di soddisfare contemporaneamente i requisiti di "precisione elevata" e "soluzione monotona" e, a prescindere da come lo si gestisca, non esiste alcun metodo per arrivare a un tale schema di approssimazione di ordine elevato.

Figura 5-3-3 Secondo il teorema di Godunov, qualsiasi schema con approssimazione di ordine superiore non è in grado di mantenere la monotonicità della soluzione (il segno del gradiente non cambia) per l'equazione lineare dell'onda. Ecco perché è stato realizzato uno schema non lineare per arrivare alla risoluzione di questo problema. Uno di questi è lo schema TVD (descritto di seguito).

Figura 5-3-4 La precisione per modifiche improvvise in un flusso, come in caso di superficie di discontinuità

5-4 Compatibilità di approssimazione al primo ordine e approssimazione di ordine elevato

▶ Come rendere compatibili approssimazione al primo ordine e approssimazione di ordine elevato

In base al teorema di Godunov, non è possibile ottenere uno schema che sia "di precisione elevata" e "che non presenti un'oscillazione della soluzione". Inoltre, a prescindere dall'approccio, non è possibile eliminare la possibilità che la soluzione oscilli. Per questo motivo, dobbiamo pensare a un sistema differente per ottenere risultati validi senza causare l'oscillazione della soluzione.

TVD

La soluzione dell'approssimazione al primo ordine è molto allargata. La precisione ottenibile non è molto elevata, ma la soluzione non oscilla e può mantenere la monotonicità. D'altro canto, mentre l'approssimazione di ordine elevato produce naturalmente dati più precisi dell'approssimazione al primo ordine, quando deve risolvere modifiche improvvise del flusso, come quelle causate da una superficie discontinua, può generare una soluzione oscillante da cui derivano valori non realistici e inconsistenze. Sia l'approssimazione al primo ordine, sia l'approssimazione di ordine superiore, presentano un vantaggio e uno svantaggio. Allora, perché non utilizzare esclusivamente i vantaggi di entrambe, a seconda del flusso, per estrarre il miglior risultato possibile dal calcolo? Quest'idea ha permesso di arrivare a una tecnica nota come TVD (diminuzione della variazione totale, Total Variation Diminishing).

La TVD è un ibrido dell'approssimazione al primo ordine e dell'approssimazione di ordine elevato. Il metodo TVD è un approccio pensato per impedire le modifiche della soluzione generale. Può determinare il cambio nell'intensità di un flusso e la maggior parte del flusso viene calcolata utilizzando un'approssimazione di ordine elevato. Quando si verificano mutamenti repentini nel flusso, però, si passa all'approssimazione al primo ordine, mantenendo così la monotonicità.

Figura 5-4-1 TVD

- Ibrido di approssimazione di primo ordine e approssimazione di ordine elevato
- A seconda del flusso, usa l'approssimazione al primo ordine o l'approssimazione di ordine elevato

	Vantaggio	Svantaggio
Approssimazione al primo ordine	Monotonicità	Allargamento della soluzione
Approssimazione di ordine elevato	Precisione elevata	Oscillazione della soluzione

⬇ Sfrutta solo i vantaggi di entrambi

TVD

SUGGERIMENTI Esistono altre tecniche, diverse dal metodo TVD, che consentono di ridurre l'oscillazione che compare quando si utilizza lo schema di approssimazione di ordine elevato. Fra le più importanti, ve ne sono una che aggiunge una viscosità numerica artificiale e un'altra denominata MUSCUL.

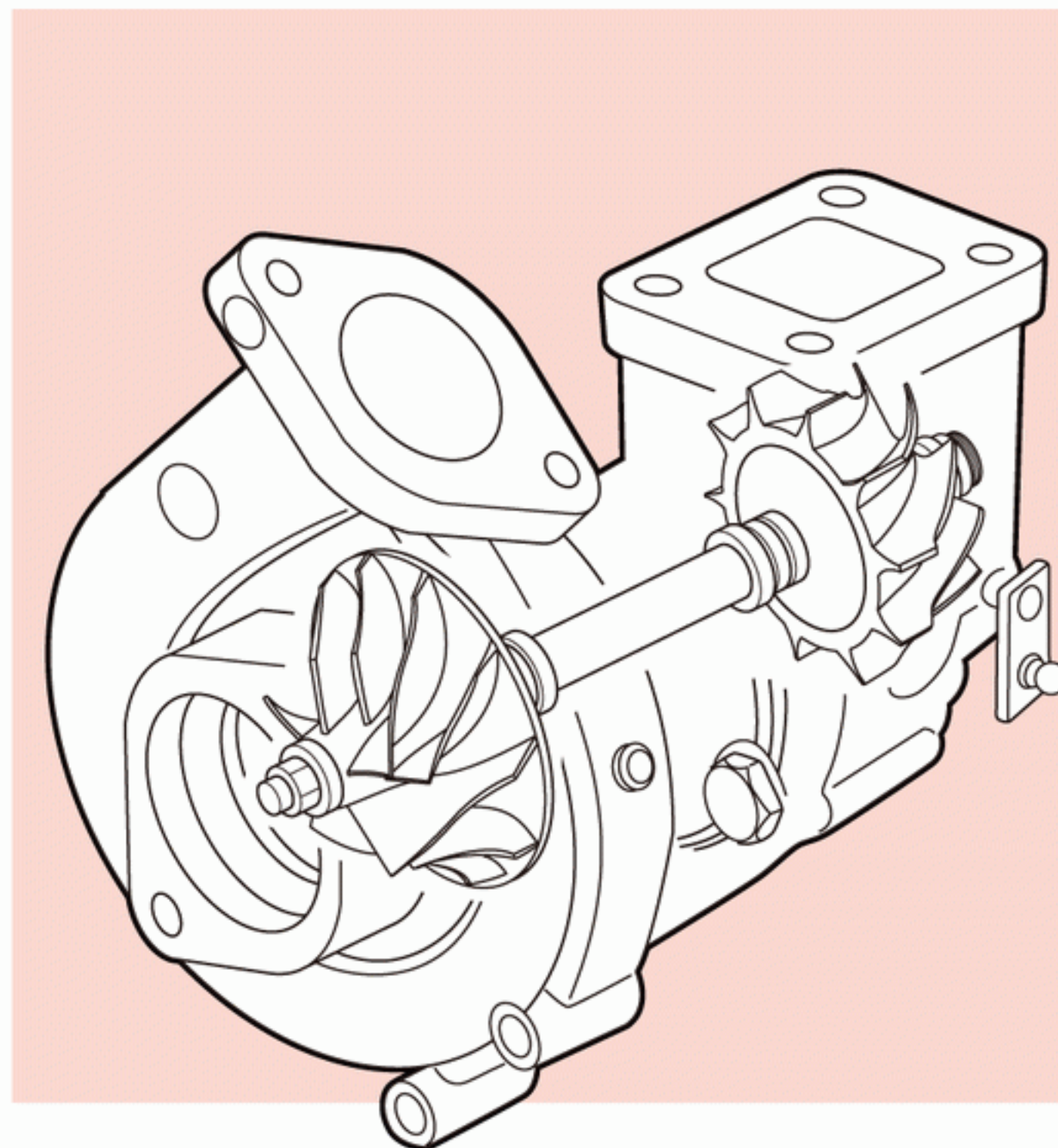
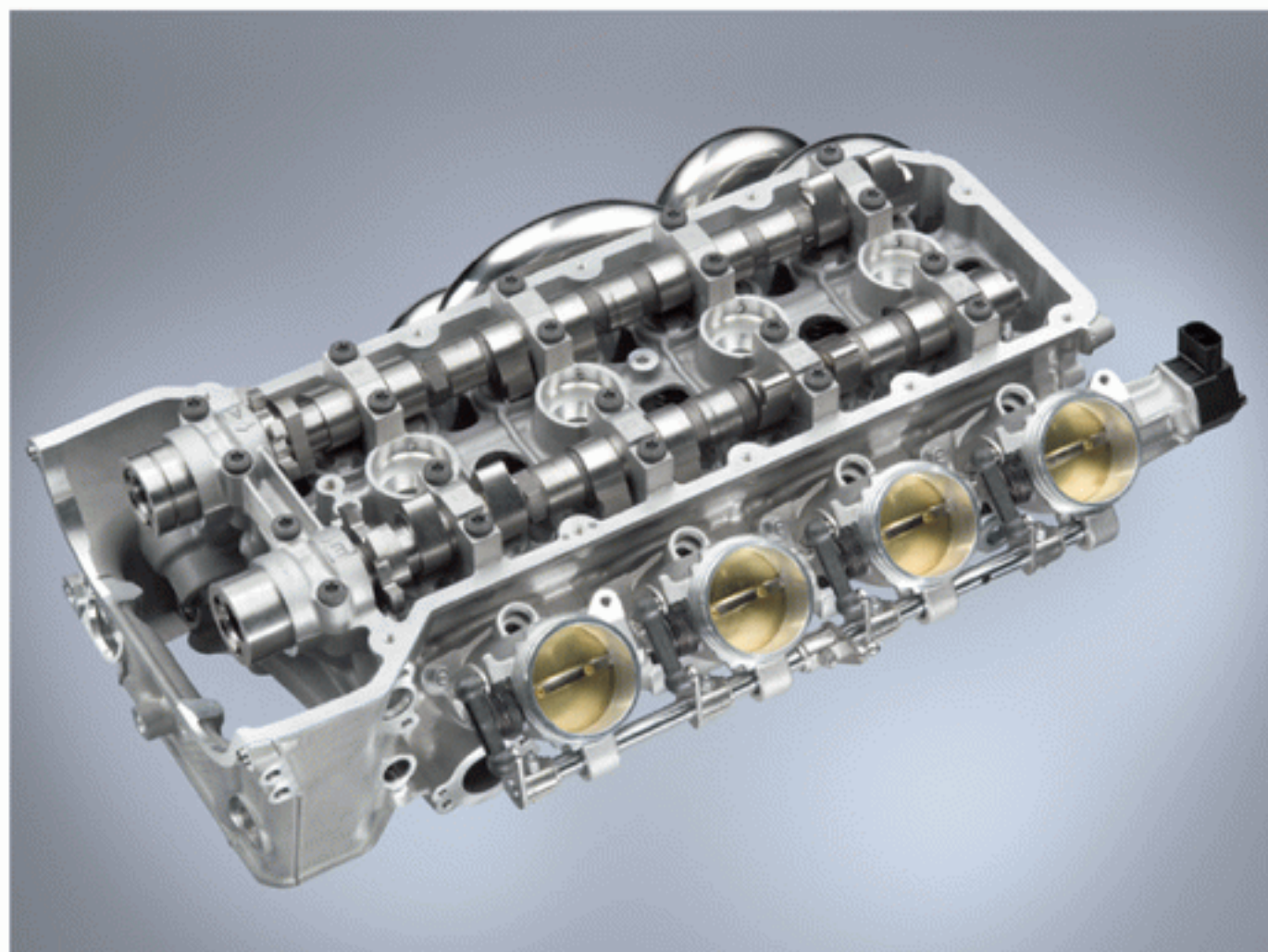
SUGGERIMENTI Gli schemi come il metodo TVD, che mantengono la precisione dell'ordine elevato nelle aree di flusso uniforme, ma nello stesso tempo riescono a cogliere chiaramente le aree discontinue, vengono comunemente chiamati schemi a risoluzione elevata.

Figura 5-4-2 I risultati ottenuti sono molto più vicini al valore reale, con l'utilizzo di TVD

Valutazione del metodo TVD

La figura 5-4-2 rappresenta il risultato di un calcolo con metodo TVD, confrontato con dei risultati ottenuti tramite schema ad approssimazione di ordine elevato e schema ad approssimazione di primo ordine. Diversamente dallo schema ad approssimazione di primo ordine, il metodo TVD mostra oscillazioni derivanti da effetti non fisici, come il superamento dei limiti superiori e inferiori. Occorre notare anche che la dispersione risulta meglio contenuta rispetto a quella dello schema ad approssimazione di primo ordine. In particolare, il metodo TVD produce risultati più vicini ai valori reali (soluzione esatta) rispetto agli altri schemi.

Però, dato che per determinare il cambio nel campo di flusso con il metodo TVD sono necessarie delle operazioni, il calcolo dei risultati richiederà molto più tempo.

SUGGERIMENTI Il metodo TVD è efficace nella risoluzione di una superficie di discontinuità, quale un'onda d'urto, ed è una tecnica largamente usata nella simulazione di fluidi comprimibili.

5-5 Risolvere la turbolenza

▶ Metodo di riduzione della complessità computazionale

Risolvere i vortici

Quando un veicolo è in movimento, attorno a esso si genera della turbolenza. Questa turbolenza è composta da vortici d'aria grandi e piccoli: per calcolare anche il vortice più semplice, però, abbiamo bisogno di almeno nove elementi di reticolo, o di griglia, come mostrato nella figura 5-5-1. Se vogliamo calcolare direttamente il set completo di vortici attorno a un veicolo, entra in gioco un numero di elementi estremamente elevato.

Se, per esempio, cerchiamo di risolvere i vortici che compongono la turbolenza attorno a un veicolo che procede a 100 km/h, il numero di elementi necessari sarebbe pari a 10^{13}. In altre parole, sarebbero necessari 10 trilioni di elementi di reticolo o di griglia! Disponendo di un computer dalla potenza elevatissima, teoricamente il calcolo potrebbe essere eseguito, ma nel mondo dell'ingegneria automobilistica l'esecuzione di calcoli di tale complessità viene ritenuta non pratica.

Figura 5-5-1 Per risolvere dei vortici bidimensionali sono necessari almeno nove elementi di reticolo

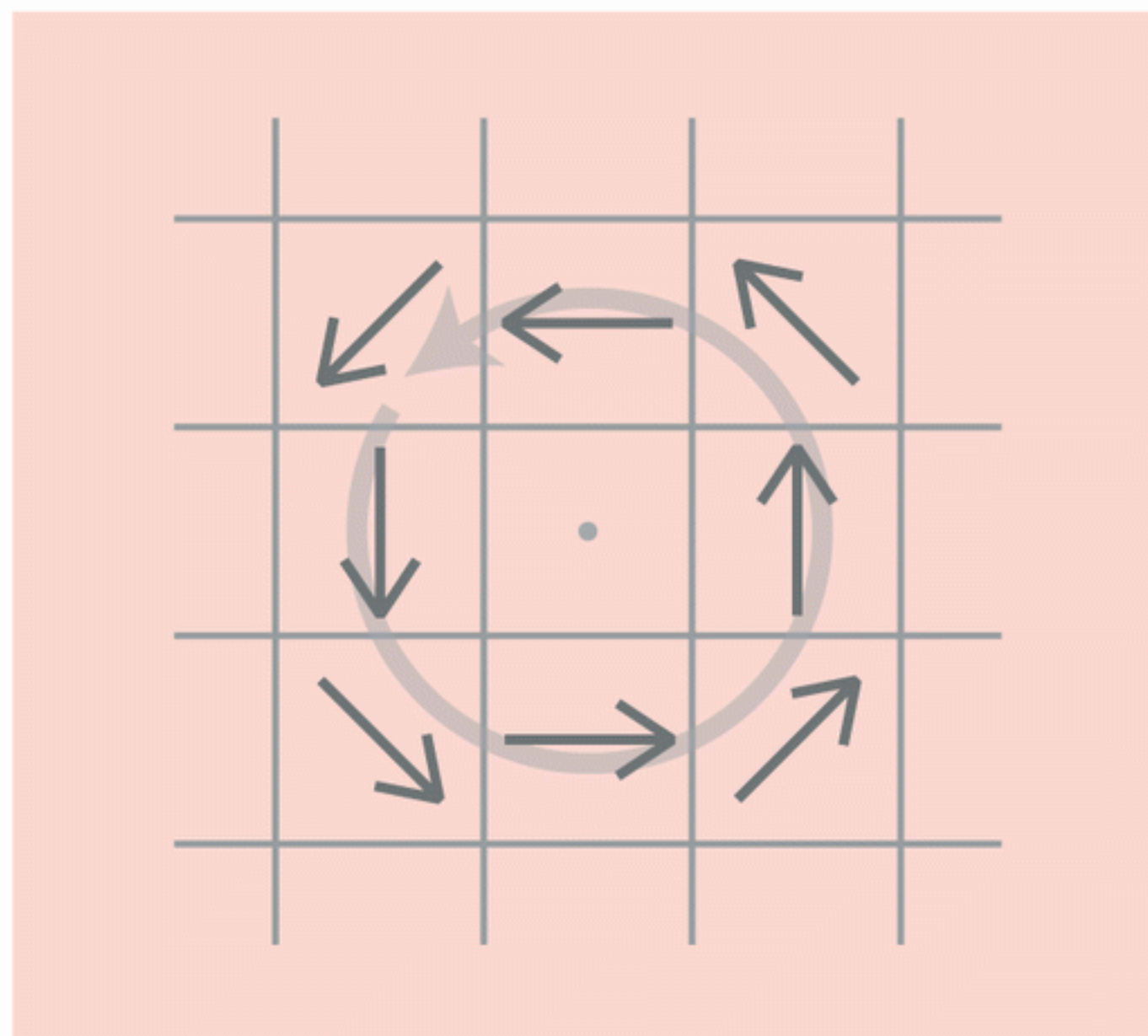
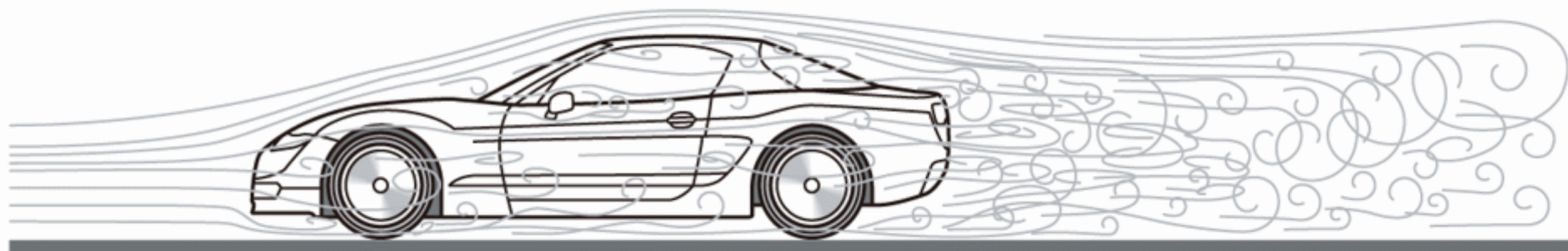



Figura 5-5-2 Il rapporto fra turbolenza e vortici d'aria

La turbolenza è composta da vortici d'aria grandi e piccoli

Modello di turbolenza

Nella teoria della meccanica dei fluidi, tramite la modellazione delle caratteristiche della turbolenza è stato possibile progredire nella comprensione della vera natura della turbolenza. Il movimento della turbolenza viene mostrato dall'equazione di Navier-Stokes, senza però che sia possibile ottenere una soluzione perfetta. Si è quindi cercato di modellare le caratteristiche chiave della turbolenza, cosa in parte riuscita. In pratica, introducendo questi modelli di turbolenza semplificati (senza tentare di trovare una soluzione per tutti i vortici, grandi e piccoli) nella CFD, si è riusciti a ridurre la complessità computazionale. Una volta detto questo, esaminiamo i modelli di turbolenza di più diffuso utilizzo, RANS e LES.

SUGGERIMENTI La risoluzione diretta dell'equazione di un fluido senza utilizzare il modello di turbolenza si definisce DNS (Direct Numerical Simulation, simulazione numerica diretta). Come abbiamo già detto, però, per eseguire un metodo DNS lo spazio dev'essere suddiviso con precisione. Inoltre, la suddivisione dello spazio comporta anche la suddivisione del tempo, aumentando nettamente la complessità computazionale.

RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes - Equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds)

RANS è un modello di turbolenza che converte la velocità del flusso della turbolenza in una velocità media, che viene divisa nei componenti di variazione. La complessità computazionale richiesta dal modello RANS è relativamente bassa, cosa che gli ha permesso di divenire il modello più diffuso. Ci sono comunque degli svantaggi, come la difficoltà nella stima precisa della separazione del flusso.

Figura 5-5-3 RANS

La turbolenza modifica la propria velocità del flusso in modo irregolare, ma può essere considerata con la velocità del flusso media e in base alla componente di variazione.

Velocità del flusso

Velocità del flusso di turbolenza = Velocità media del flusso + Componente di variazione

Velocità media del flusso

Componente di variazione

Tempo

LES (Large Eddy Simulation)

In rapporto alla turbolenza, i vortici di grandi dimensioni rappresentano un'influenza dominante nella misurazione della turbolenza. Più piccolo è un vortice, più debole è l'influenza complessiva del campo sul flusso. Se tralasciamo i vortici più piccoli e calcoliamo direttamente il vortice grande, i piccoli vortici vengono modellati con un processo chiamato LES. Il LES è in grado di calcolare il campo di flusso con un livello di precisione molto più elevato del sistema RANS, ma richiede un livello di complessità computazionale altrettanto elevato.

Figura 5-5-4

Risoluzione diretta soltanto del vortice grande

Analisi: Meccanica

2

Struttura

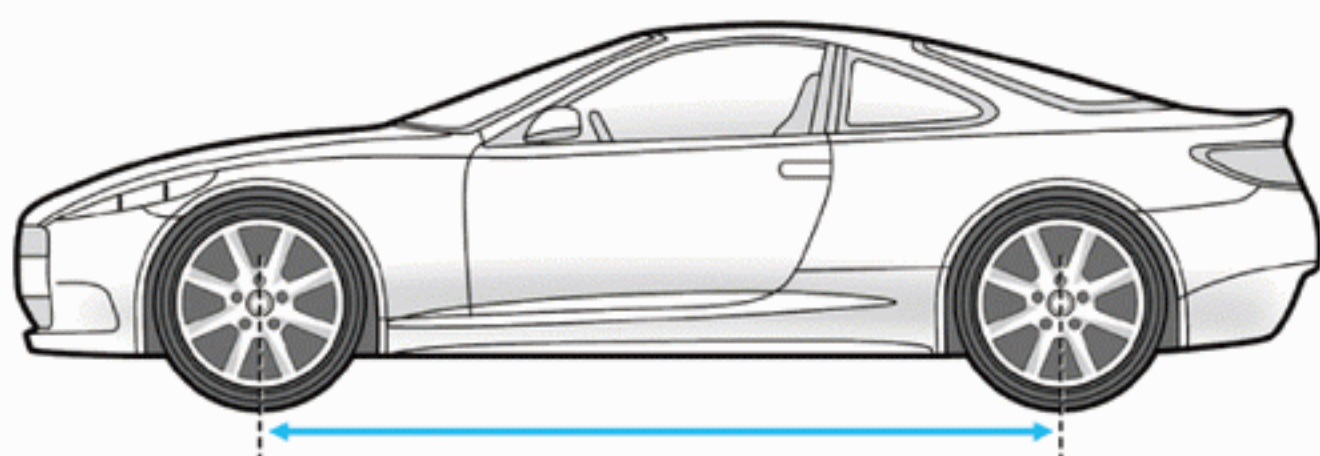
Specifiche di base

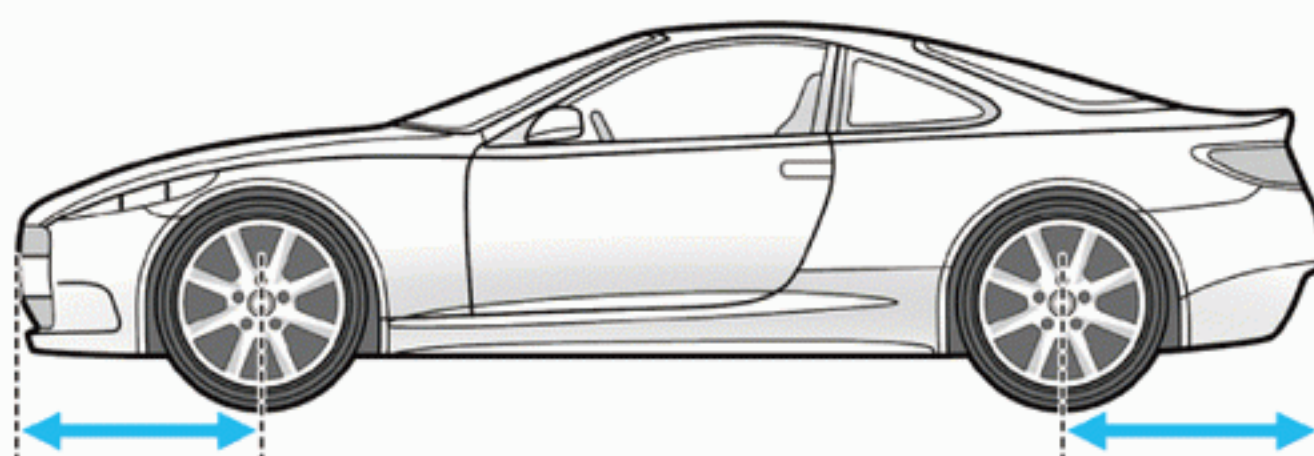
Le caratteristiche e le prestazioni dei veicoli cambiano notevolmente a seconda dell'uso per cui vengono realizzati. Quando scegli una vettura, è importante comprenderne i principi fondamentali.

Dimensioni

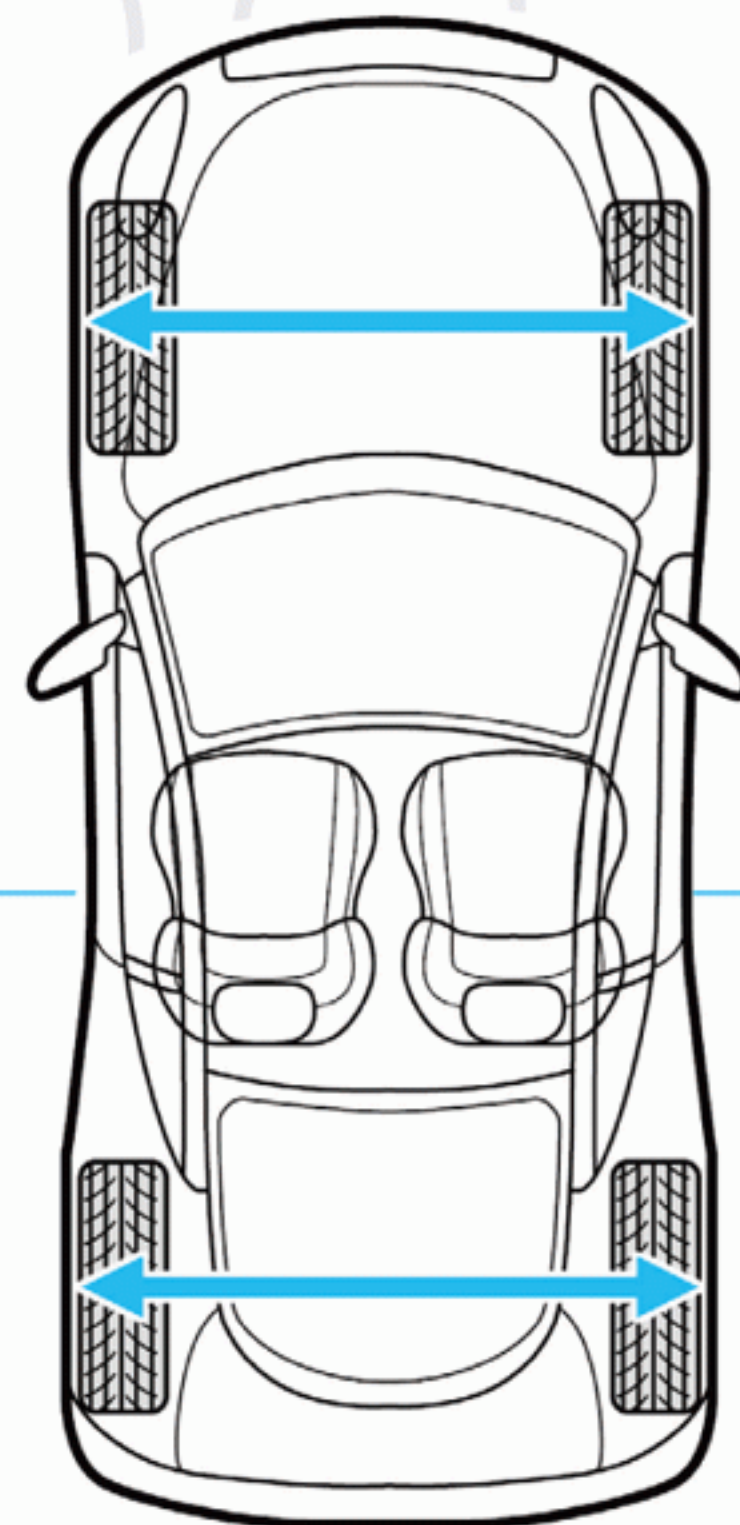
Il telaio della vettura e la configurazione principale dei suoi componenti sono le specifiche più basilari e vengono definite fin dalle prime fasi di progettazione. Queste influiscono direttamente su aspetti chiave come la guida, l'inserimento in curva e la frenata, e sarà difficile rimediare a eventuali carenze con l'elaborazione. I vantaggi ottenuti attraverso l'elaborazione dipendono, inoltre, dal potenziale di base della vettura. Perciò, per elaborarla correttamente e sviluppare tutto il suo potenziale, dovrai studiare il modo in cui le specifiche di base influiscono sulla prestazione di guida.

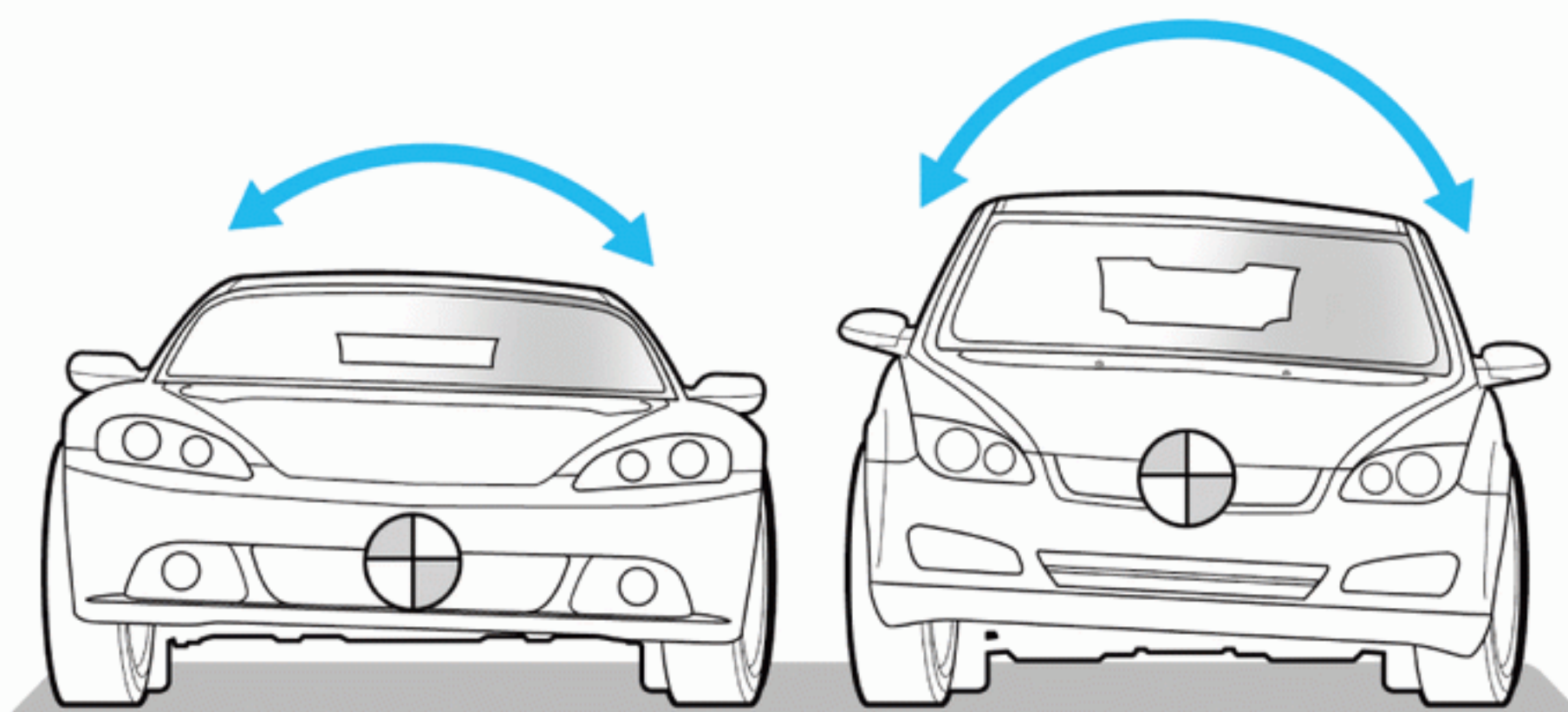
Passo

Il passo è la distanza tra il centro dell'avantreno e il centro del retrotreno, considerando la vettura vista lateralmente. Questa distanza influisce molto sulla stabilità dell'auto: con un passo maggiore, la vettura risentirà meno degli effetti delle irregolarità del fondo stradale e del vento trasversale, restando perciò più stabile e confortevole in rettilineo. Un passo più corto, pur riducendo la stabilità, migliora la risposta dello sterzo e permette di affrontare le curve più agilmente. Per quanto riguarda il comfort, generalmente un passo più lungo viene considerato migliore.

Sbalzo

Per "sbalzo" si intende la lunghezza della vettura al di là del centro dell'avantreno fino alla punta del paraurti anteriore (sbalzo anteriore), e del retrotreno fino alla punta del paraurti posteriore (sbalzo posteriore). Se il peso contenuto nello sbalzo è importante, l'auto sarà poco manovrabile e opporrà resistenza alla sterzata (più tecnicamente, avrà una maggiore inerzia di imbardata). È per questo motivo che si cerca di mantenere la meccanica dell'auto il più possibile all'interno del passo, in particolar modo per componenti pesanti come il motore. Tuttavia, uno sbalzo di una certa lunghezza è comunque richiesto dall'aerodinamica, perciò il problema non può essere evitato del tutto.

Le prestazioni dell'auto dipendono dalle dimensioni e dal peso

Carreggiata

La "carreggiata" è la distanza fra le ruote sinistre e destre della vettura. Una carreggiata più larga consente di abbassare il centro di gravità della vettura. In generale, aumentando la carreggiata migliora la trazione in curva, mentre incrementando la carreggiata delle ruote motrici si aumenta la superficie di contatto e, di conseguenza, il trasferimento della potenza alla superficie stradale. Una carreggiata più stretta dà agilità in manovra, ma riduce la stabilità. Per migliorare la tenuta, le vetture da gara hanno spesso una carreggiata di dimensioni diverse fra avantreno e retrotreno.

Altezza

L'altezza di una vettura si misura dalla superficie della strada al suo punto più alto. Con un'altezza minore, il centro di gravità sarà più basso, riducendo il rollio e aumentando la velocità in curva. In compenso, questo riduce anche lo spazio nell'abitacolo e limita la corsa delle sospensioni (lo spazio a disposizione per contrarre ed espandere gli ammortizzatori), con conseguente rischio di contatto con il suolo.

Peso

Il peso è un fattore cruciale per le prestazioni della vettura. A parità di velocità e manovrabilità, un'auto più leggera richiede meno potenza motore, logora meno i freni ed è più efficiente in curva. Il rapporto peso-potenza indica il peso della vettura diviso per la sua erogazione massima: più basso è questo rapporto, più aumentano l'accelerazione e la manovrabilità sportiva, riducendo però l'efficienza nei consumi. Poiché l'impatto ambientale è un fattore di crescente importanza nell'industria automobilistica, la riduzione del peso di una vettura è diventata cruciale in fase di progettazione.

Distribuzione dei pesi e trasmissione

Come dimensioni e peso, anche la configurazione della trasmissione è una specifica fondamentale. Gran Turismo utilizza un codice a due lettere per indicare la posizione "anteriore", "centrale" o "posteriore" rispettivamente del motore e delle ruote motrici. FF, FR, MR e RR sono alcune delle configurazioni più comuni. La posizione del motore (che è la parte più pesante dell'auto) e quella delle ruote motrici hanno effetti determinanti sulla distribuzione dei pesi e sul movimento.

Nelle vetture con una buona distribuzione, la potenza del motore viene trasmessa efficacemente alle ruote motrici, migliorando partenza, accelerazione e frenata ad andatura elevata, grazie alla riduzione del beccheggio.

Il vantaggio cruciale di una buona distribuzione dei pesi è la tenuta in curva: una distribuzione inadeguata dei pesi rende la vettura più vulnerabile alla forza centrifuga, aumentando il rischio di un testacoda.

In una distribuzione ideale, il peso è perfettamente bilanciato tra parte anteriore e posteriore e tra destra e sinistra. Nelle vetture FR, con motore anteriore e trazione posteriore, questo avviene facilmente, mentre nelle FF (e nelle 4WD, spesso basate su configurazioni FF), con motore anteriore e trazione anteriore, la parte anteriore sarà più pesante e, ancora, nelle RR sarà più pesante il lato posteriore. La maggior parte delle moderne vetture FF monta il motore trasversalmente, in modo da migliorare la distribuzione dei pesi.

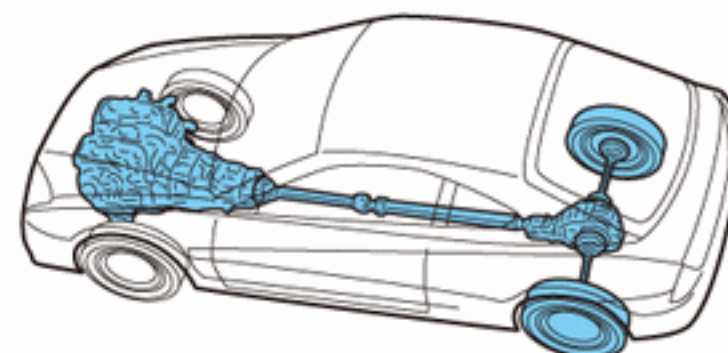
Eventuali problemi dovuti alla distribuzione dei pesi possono comunque essere risolti, almeno parzialmente, elaborando l'auto o adottando determinate tecniche di guida. Ma è proprio a causa di elementi come questo che, di solito, una vettura MR riesce a battere una vettura FR con un buon bilanciamento.

Manovrabilità e struttura di base

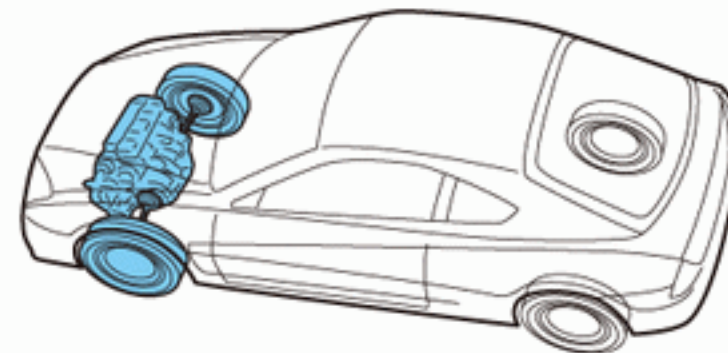
Configurazioni della trasmissione

FR

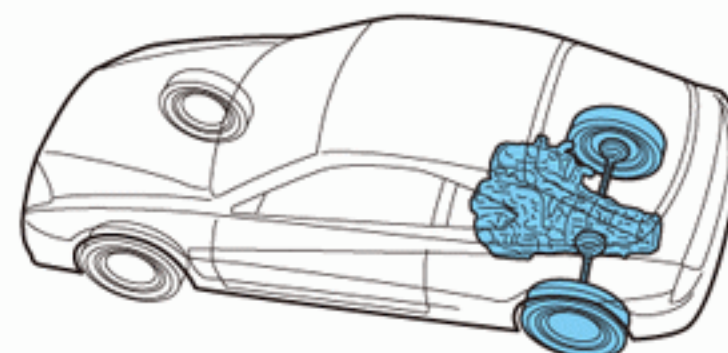
Motore anteriore, trazione posteriore

Una configurazione convenzionale, con il motore all'anteriore e la trazione al retrotreno, che permette di ottenere facilmente una buona distribuzione dei pesi. Oltre a buone caratteristiche di maneggevolezza, presenta una buona risposta dello sterzo, dato che le ruote sterzanti sono diverse da quelle motrici. Può però essere difficile avere trazione (e quindi potenza) su alcune superfici.

FF

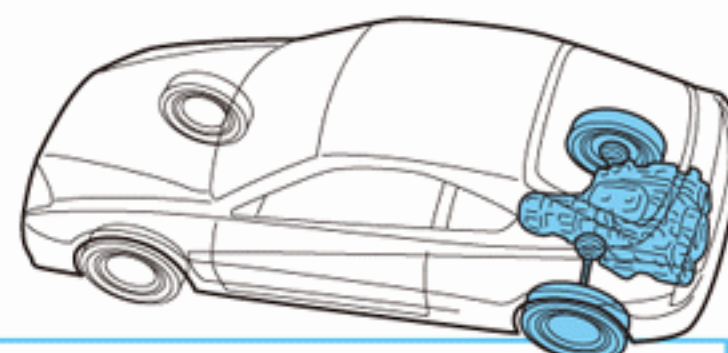
Motore anteriore, trazione anteriore

Uno schema con motore e ruote motrici sull'anteriore. Collocando motore e cambio nella parte anteriore della vettura, si libera spazio per l'abitacolo ma si sbilancia il peso in avanti. Inoltre, le ruote anteriori devono gestire sia la potenza di trazione sia lo sterzo, distribuendo l'aderenza tra il movimento longitudinale e trasversale durante le curve. Questa configurazione è perciò poco adatta alle vetture ad alta potenza.

MR

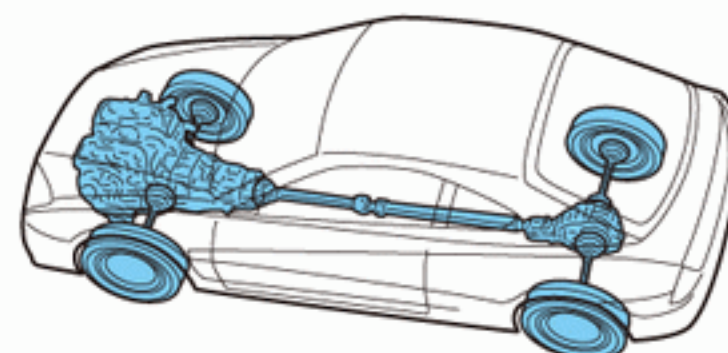
Motore centrale, trazione posteriore

Una configurazione con motore centrale e ruote posteriori motrici che avvicina il motore al centro di gravità della vettura, permettendo curve più strette e assicurando la massima aderenza ad avantreno e retrotreno sia in accelerazione sia in frenata. Questa configurazione è frequente nelle auto sportive e da gara, dove la velocità è l'aspetto più importante.

RR

Motore posteriore, trazione posteriore

Uno schema con trazione posteriore, dove il motore è situato nella parte posteriore dell'auto, dietro le ruote. Questa configurazione concentra il peso sul retro del veicolo, premendo le ruote posteriori contro il fondo stradale, aumentando trazione e accelerazione. Allo stesso tempo, però, riduce il carico sull'avantreno, aumentando il rischio di sottosterzo in inserimento di curva. Inoltre, se la vettura sbanda, il carico al retrotreno rende più difficile recuperare l'assetto.

4WD

Trazione integrale

In questa configurazione, la potenza viene trasmessa a tutte e quattro le ruote. Nonostante il peso maggiore, questa configurazione è eccellente per la partenza da fermo e l'accelerazione, al prezzo di una minore destrezza in curva. È possibile trasformare una qualsiasi configurazione in una 4WD, ma con risultati molto diversi a seconda dello schema di partenza. In generale, le ruote anteriori o posteriori vengono considerate le ruote motrici "principali": quando queste ruote slittano, viene trasmessa più coppia alle altre.

Il cuore dell'automobile

Il motore è il cuore dell'automobile. Per ottenere il 100% dalla tua auto, dovrai imparare a conoscere il motore e il suo funzionamento.

Meccanica e principi

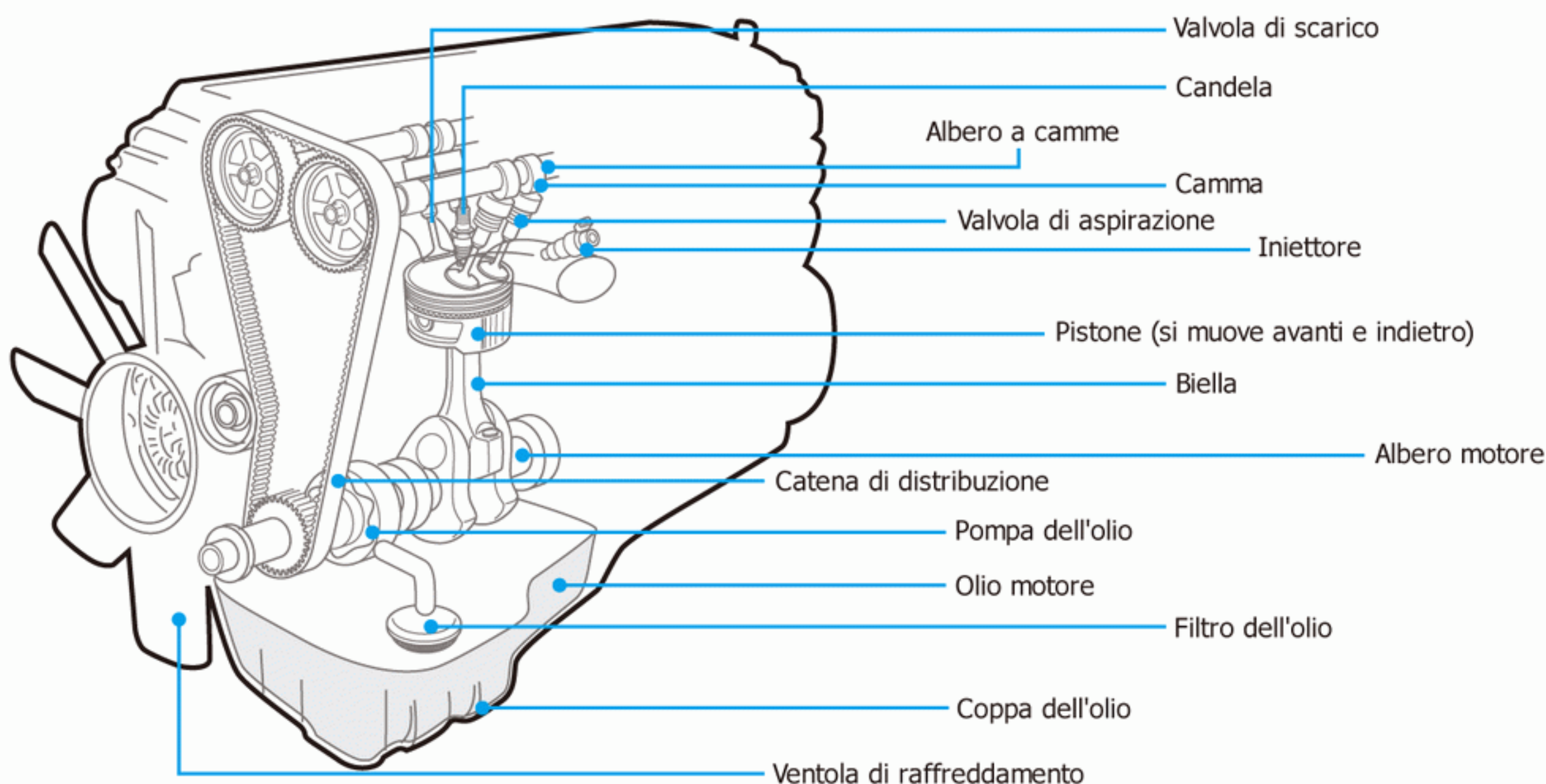
La maggior parte delle auto monta motori a quattro tempi a movimento alternativo, cioè con pistoni che vanno avanti e indietro per sviluppare energia. Le fasi del ciclo a quattro tempi sono aspirazione, compressione, combustione/espansione e scarico.

Osserviamo più da vicino queste quattro fasi distinte. Nella prima, o fase di aspirazione, la valvola di aspirazione si apre appena prima che il pistone raggiunga il punto morto superiore. Quando il pistone inizia a scendere, aspira una miscela di aria e combustibile attraverso la valvola aperta. Quando il pistone raggiunge il punto morto inferiore, la fase di aspirazione è conclusa e inizia la compressione, in cui le valvole si chiudono e il pistone risale e comprime la miscela aria-combustibile nel cilindro.

Subito dopo che il pistone ha raggiunto il punto morto superiore, comprimendo la miscela aria-combustibile, la candela fa scoccare una scintilla facendo esplodere la miscela: è la fase di combustione/espansione in cui, nel cilindro, si raggiungono temperature fino a 2.000 °C e pressioni fino a 200 atmosfere. La forza dell'espansione spinge di nuovo il pistone verso il basso, facendo ruotare l'albero a gomiti e convertendo energia termica in energia rotazionale.

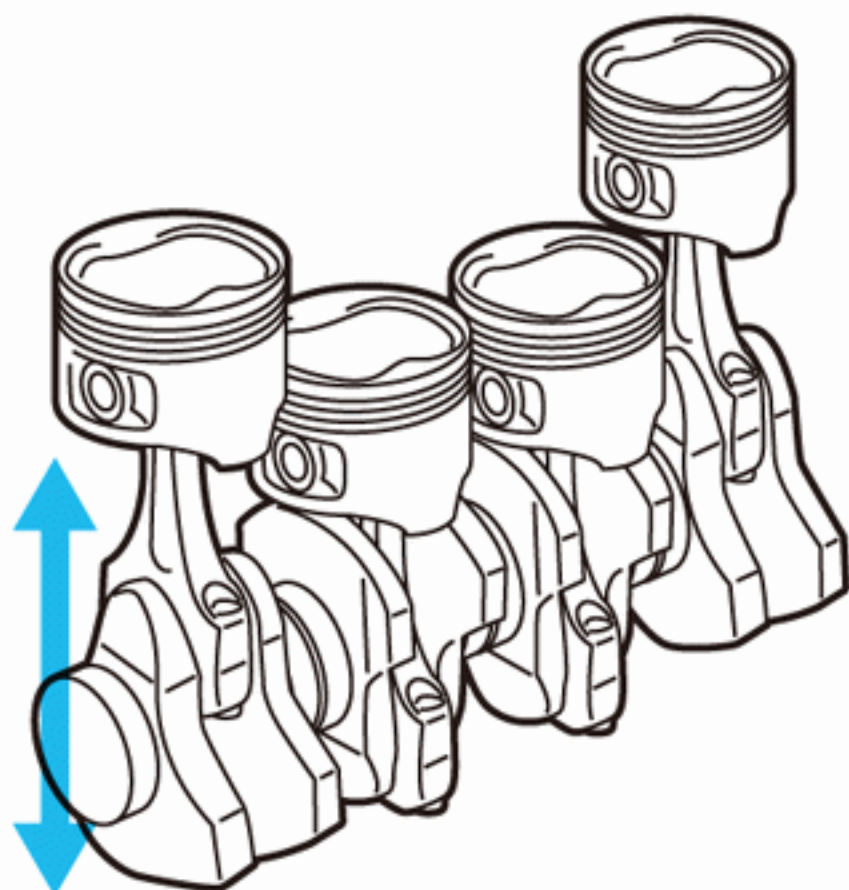
Quando il pistone raggiunge di nuovo il punto morto inferiore inizia la fase di scarico, in cui le valvole di scarico si aprono e lasciano defluire i gas combusti, spinti non tanto dal movimento del pistone quanto dalla loro stessa temperatura e pressione. Quando il pistone torna al punto morto superiore, le valvole di aspirazione si aprono e il ciclo ricomincia.

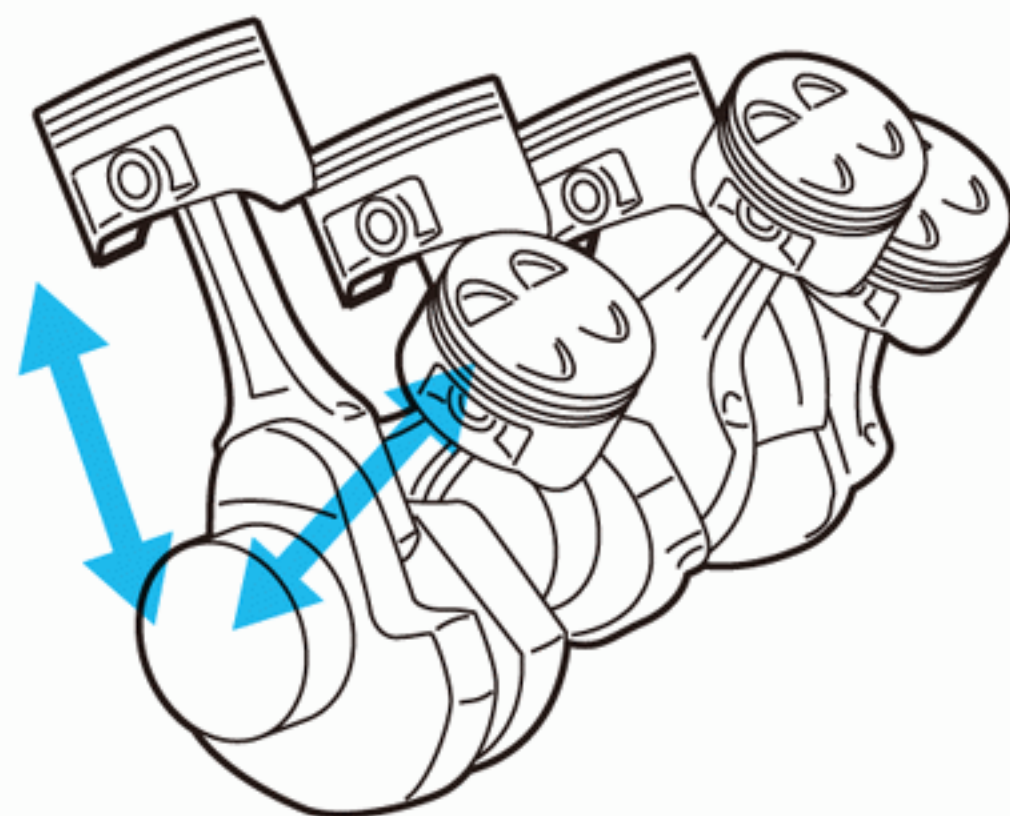
In un motore a movimento alternativo, queste quattro fasi si ripetono facendo girare l'albero motore centinaia di volte al minuto al minimo di giri e migliaia ad alta velocità, per garantire alla vettura potenza in modo continuativo.

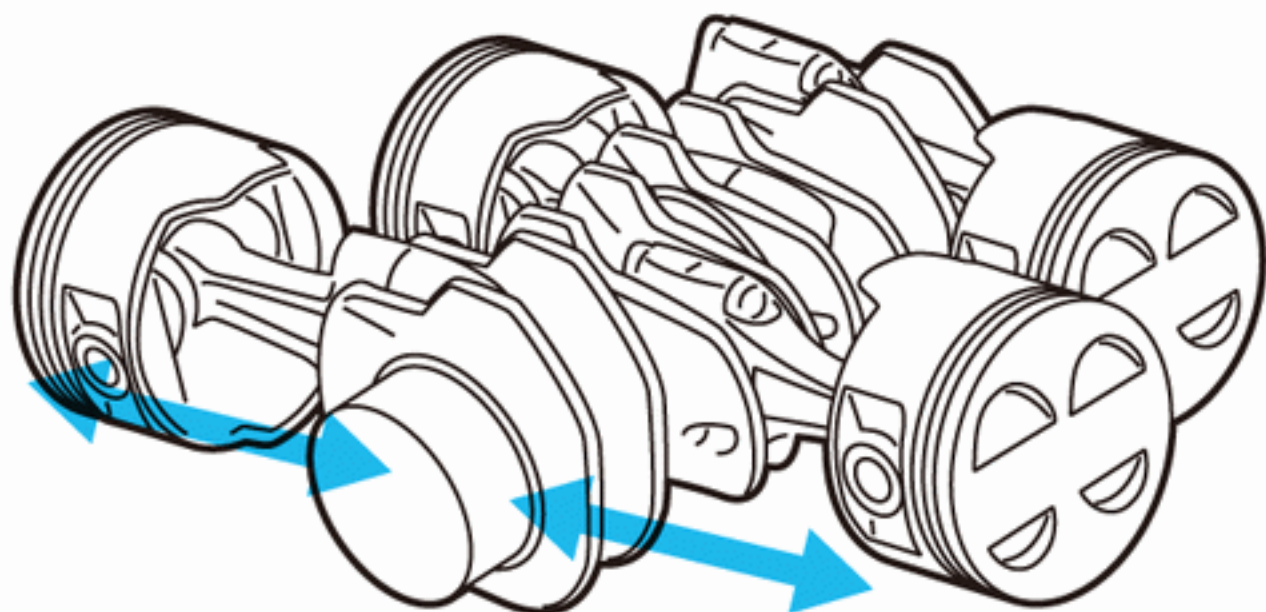
Valvola di scarico
Candela
Albero a camme
Camma
Valvola di aspirazione
Iniettore
Pistone (si muove avanti e indietro)
Biella
Albero motore
Catena di distribuzione
Pompa dell'olio
Olio motore
Filtro dell'olio
Coppa dell'olio
Ventola di raffreddamento

Come funziona un motore?

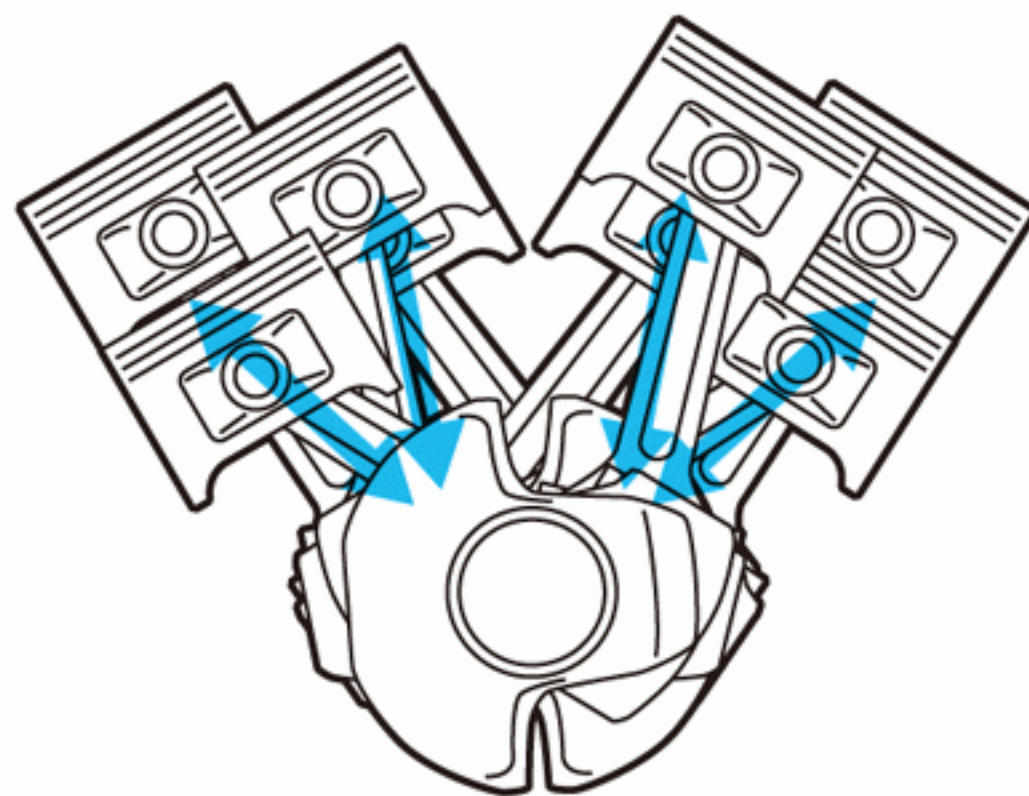
Configurazioni dei cilindri

Cilindri in linea

Più cilindri sono disposti su una singola fila. I cilindri sono allineati e condividono lo stesso albero a gomiti: il monoblocco è in un solo pezzo, perciò la sua struttura è semplice e relativamente leggera. Tuttavia, per più cilindri occorre un motore più lungo e, di conseguenza, più spazio nella vettura, cosa che a volte può rappresentare un problema.

Cilindri a V

I cilindri sono inclinati alternativamente a destra e sinistra, formando una V. L'albero a gomiti è più corto e, anche con molti cilindri, la struttura resta compatta. Le vibrazioni sono minori, a prescindere dal numero di cilindri, e le dimensioni ridotte di monoblocco e albero a gomiti migliorano la rigidità del motore.

Cilindri contrapposti

I cilindri si alternano e sono disposti in orizzontale. I cilindri di destra e di sinistra sono contrapposti orizzontalmente e si congiungono all'albero a gomiti, situato al centro. A volte vengono definiti motori "boxer", poiché il movimento dei pistoni ricorda i jab del pugilato. Il vantaggio di questo motore è il basso centro di gravità, dovuto all'altezza ridotta.

Cilindri a W

Questa configurazione si riferiva originariamente a un singolo albero a gomiti con tre file di cilindri disposte a W, ma oggi può indicare anche due motori a V congiunti. Il motore a W è ancora più largo del motore a V, ma l'albero a gomiti più corto lo rende la scelta ideale per i motori da dodici o più cilindri.

Configurazioni delle valvole

Un motore a quattro tempi ha due tipi di valvole: quelle di aspirazione, che si aprono per fare entrare la miscela aria-carburante nel motore, e quelle di scarico, che si aprono per fare uscire i gas ormai combusti. Le valvole, situate nella testata, hanno l'importante compito di aprire e isolare la camera di combustione.

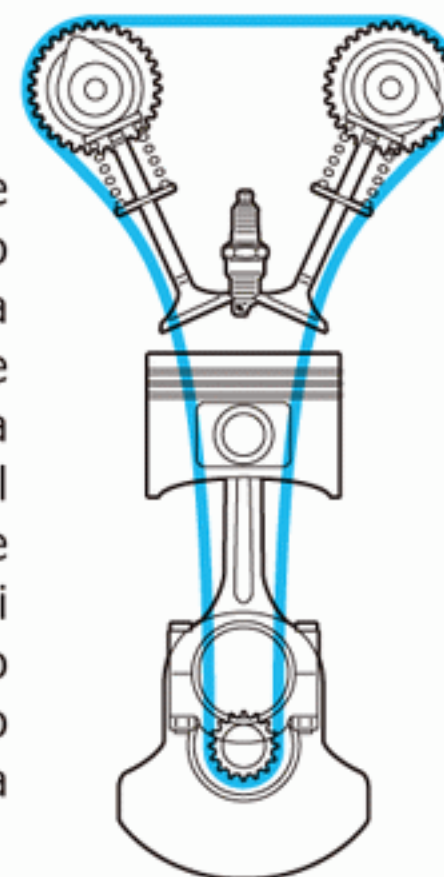
I motori moderni hanno tipicamente l'albero a camme posto sopra il motore, per consentire un azionamento più affidabile delle valvole. Molti motori hanno quattro valvole per cilindro, due di aspirazione e due di scarico, ma quelli con una sola valvola di aspirazione e una di scarico offrono una combustione efficiente anche a bassi regimi e sono probabilmente destinati a ritornare in auge.

La tendenza più recente è la fasatura variabile. Nata per offrire due fasature delle valvole, una per i bassi regimi e una per gli alti regimi, si è evoluta per variare la fasatura in modo continuo, secondo il numero di giri del motore. Nei più recenti motori "Valvetronic" di BMW la regolazione di potenza avviene direttamente senza la valvola a farfalla, raggiungendo così una maggiore efficienza.

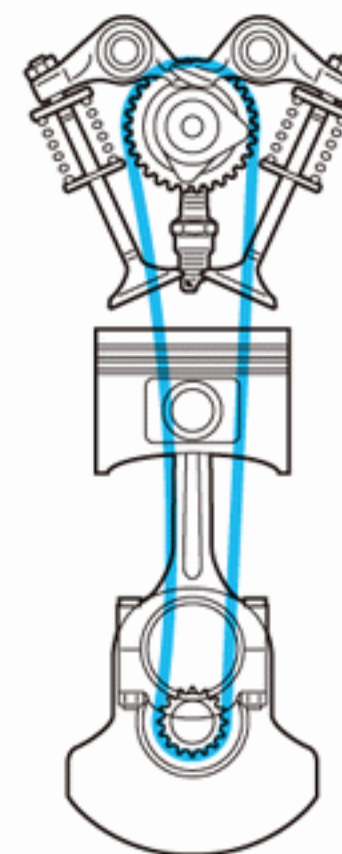
Tipi di configurazioni delle valvole

DOHC

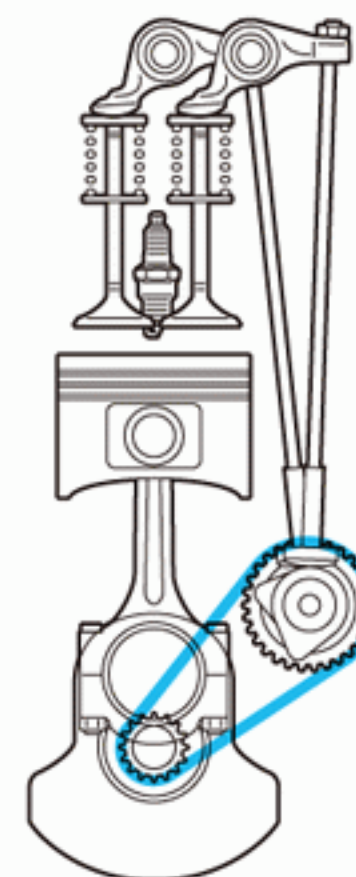
Doppio albero a camme in testa

In un motore DOHC (Double Overhead Camshaft, ovvero doppio albero a camme in testa), un albero a camme aziona le valvole di aspirazione e l'altro le valvole di scarico. Questa configurazione offre stabilità e riduce il carico di fatica distribuendolo tra i due alberi e l'inerzia, permettendo così di raggiungere un regime di giri più elevato e di erogare più potenza. Per questo motivo, è la configurazione più adottata nei recenti motori ad alte prestazioni.

SOHC

Singolo albero a camme in testa

In un motore SOHC (Single Overhead Camshaft, ovvero singolo albero a camme in testa) è presente un solo albero a camme che aziona le valvole sia di aspirazione sia di scarico. In base al tipo di camera di combustione, l'albero a camme può azionare le valvole direttamente oppure attraverso dei bilancieri. Rispetto a un motore OHV, le valvole si muovono in modo più affidabile e sono possibili regimi più elevati. Rispetto ai motori DOHC, il movimento delle valvole è meno regolare, ma questo propulsore non è inferiore in partenza, tanto che esistono SOHC ad alti regimi.

OHV

Valvole in testa

In un motore a valvole in testa (OHV, Overhead Valve), come suggerisce il nome, le valvole sono montate sulla testata. A differenza delle configurazioni SOHC o DOHC, l'albero a camme è collocato lateralmente al cilindro e aziona le valvole tramite lunghi bracci detti "aste". È una configurazione semplice e di facile manutenzione, ma non è adatta a una potenza elevata, poiché i motori di questo tipo non sono affidabili a un alto regime.

Motori rotativi

I motori rotativi (noti anche come motori Wankel) producono potenza attraverso le stesse quattro fasi di aspirazione, compressione, combustione e scarico dei motori alternativi. Queste funzioni si svolgono tuttavia in modo completamente diverso.

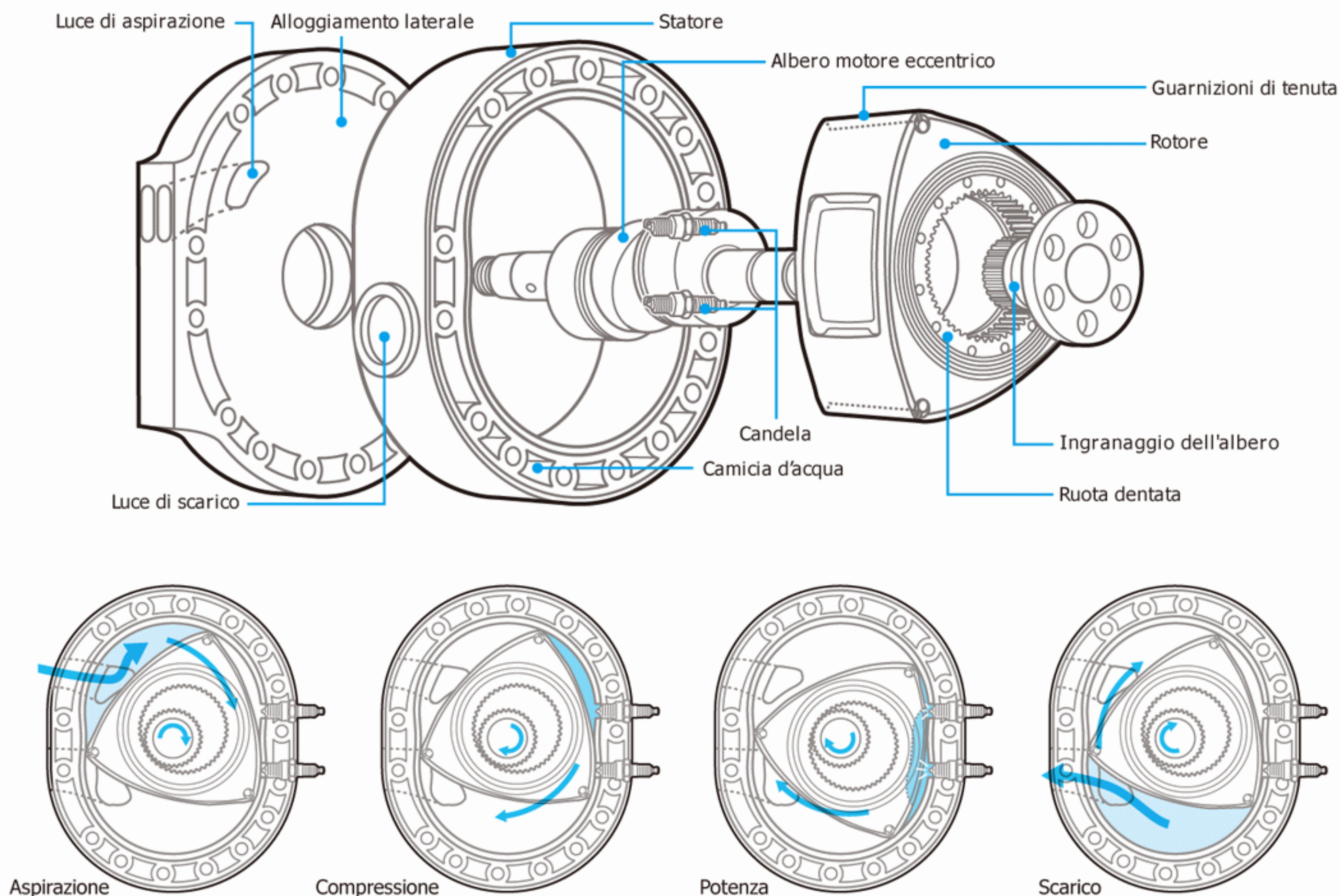
Invece dei cilindri, questo tipo di motore ha una carcassa a forma di bozzolo (epitrocoide), detta statore, che racchiude un rotore a sezione triangolare che ruota in modo eccentrico, espandendo e contraendo lo spazio tra sé e la parete dello statore. È in questo spazio che si svolgono le quattro fasi di aspirazione, compressione, combustione e scarico. Un motore rotativo è generalmente formato da due o tre rotori e dai rispettivi statori.

Nei tradizionali motori di tipo alternativo, il movimento di numerosi pistoni rende difficile controllarne la potenza, creando rumore e vibrazioni. Il movimento rotatorio del Wankel consente, invece, un funzionamento più morbido. Un altro vantaggio di questo tipo di motore è la mancanza di valvole, che riduce di molto il numero di parti necessarie. In passato, i motori rotativi erano anche decisamente più leggeri e hanno tuttora un certo vantaggio rispetto ai motori di tipo alternativo, anche se i progressi della tecnologia hanno ridotto questa differenza.

I tempi dei processi di aspirazione e scarico in un motore rotativo dipendono dalla forma e dalla posizione delle luci (i canali di entrata e di uscita dei gas) sulla superficie dello statore. Mettere a punto aspirazione e scarico, in un motore come questo, significa cambiare sagoma e posizione delle luci. Inoltre, poiché i gas di scarico vengono emessi direttamente attraverso il condotto di scarico, senza alcuna valvola, i motori rotativi funzionano bene con i turbocompressori.

Rispetto a un motore di tipo alternativo, il motore rotativo presenta uno svantaggio in termini di consumo di carburante. Ciò è dovuto alla maggiore dimensione della superficie rispetto alla capacità della camera di combustione, con aumento delle perdite di calore e rendimento ridotto nella conversione di energia termica in energia meccanica.

Luce di aspirazione
Alloggiamento laterale
Statore
Albero motore eccentrico
Guarnizioni di tenuta
Rotore
Candela
Camicia d'acqua
Ingranaggio dell'albero
Ruota dentata
Luce di scarico

Aspirazione
Compressione
Potenza
Scarico

Sovralimentazione

La potenza del motore dipende dalla quantità di aria immessa al suo interno. Il modo più semplice per aumentarla è quello di incrementare la cilindrata del propulsore.

Si può comunque ottenere un effetto simile con un'operazione diversa, tramite un processo noto come "sovralimentazione", che immette un maggiore quantitativo d'aria nel motore tramite compressione. I dispositivi in grado di effettuare questa operazione si dividono in due categorie: compressori volumetrici e turbocompressori.

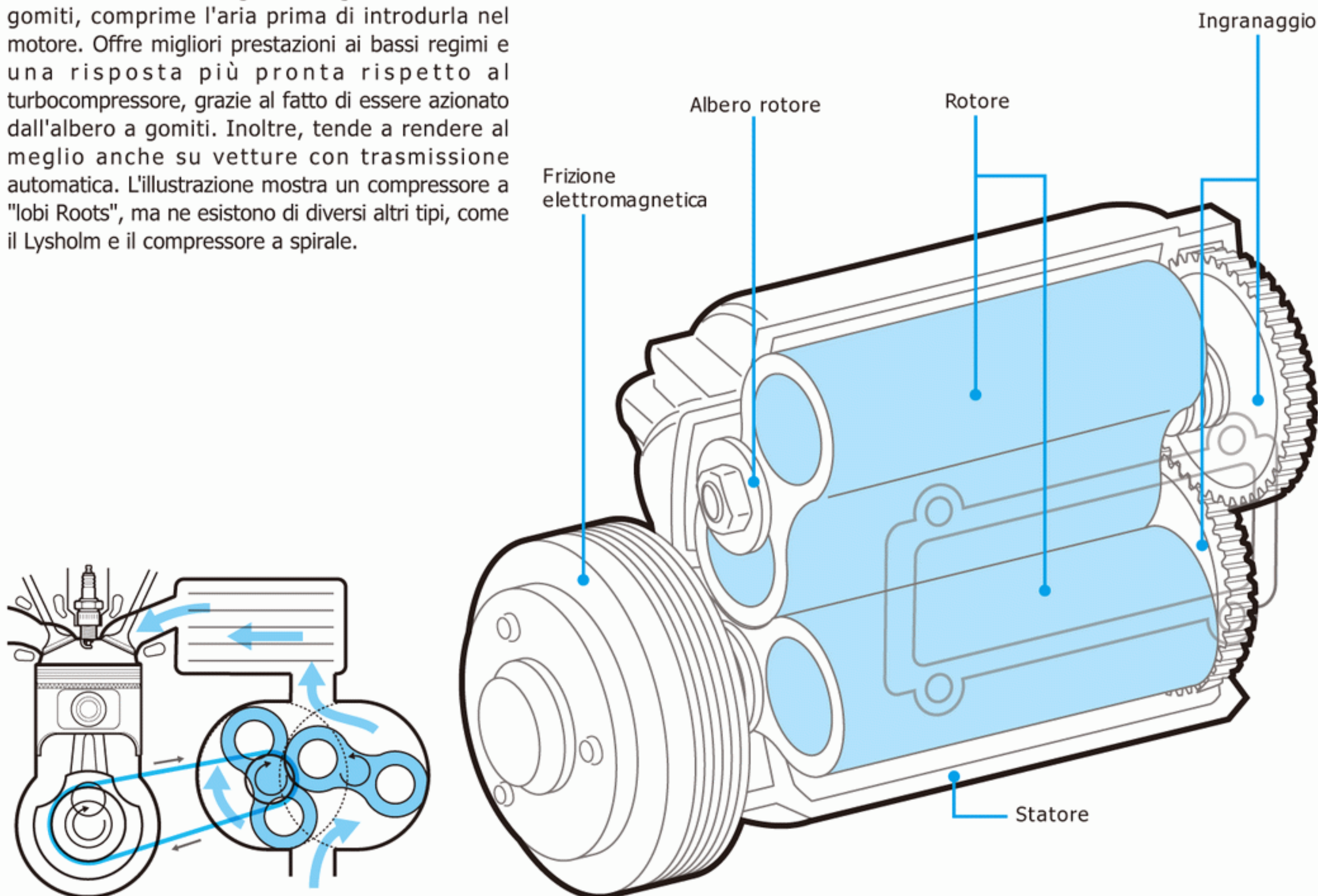
Maggiore è la pressione dell'aria di sovralimentazione, maggiore sarà la potenza raggiungibile. La normale pressione atmosferica al livello del mare equivale a un bar, ovvero 1 kg/cm2. Se aggiungiamo un bar di sovralimentazione, la pressione sarà di due bar (un bar di pressione naturale e uno di sovralimentazione) e l'aria immessa sarà quindi doppia rispetto alla norma.

Lo svantaggio della sovralimentazione è che l'energia della combustione, aumentando di pari passo con la pressione, potrebbe arrivare a danneggiare il motore. È per questo motivo che i componenti interni dei motori sovralimentati vengono irrobustiti e il rapporto di compressione viene ridotto per eliminare i problemi di un'errata combustione.

L'aria compressa subisce un aumento di temperatura e un abbassamento di densità. Questo effetto, ancora più evidente in condizioni di guida impegnative e clima caldo, impedisce al motore di fornire la massima erogazione. Un aumento della

Compressori volumetrici

Il compressore volumetrico, generalmente alimentato da una cinghia collegata all'albero a gomiti, comprime l'aria prima di introdurla nel motore. Offre migliori prestazioni ai bassi regimi e una risposta più pronta rispetto al turbocompressore, grazie al fatto di essere azionato dall'albero a gomiti. Inoltre, tende a rendere al meglio anche su vetture con trasmissione automatica. L'illustrazione mostra un compressore a "lobi Roots", ma ne esistono di diversi altri tipi, come il Lysholm e il compressore a spirale.

Ingranaggio
Albero rotore
Rotore
Frizione elettromagnetica
Statore

Ottenere lo stesso effetto dell'aumento di cilindrata

temperatura di un grado provoca una perdita di circa un cavallo vapore (CV) ed è per questo che si ricorre agli intercooler per raffreddare l'aria compressa.

I turbocompressori richiedono del tempo per attivarsi, dato che la sovralimentazione è attivata dall'energia degli scarichi: per questo c'è un piccolo ritardo nell'aumento della pressione. I compressori volumetrici, attivati dall'albero a camme, non soffrono di questo problema, ma sfruttando l'albero a camme riducono di una piccola frazione la potenza generata dal motore.

Recentemente sono emersi motori che uniscono i vantaggi di entrambe le soluzioni, utilizzando un compressore per i bassi regimi e un turbocompressore per quelli elevati.

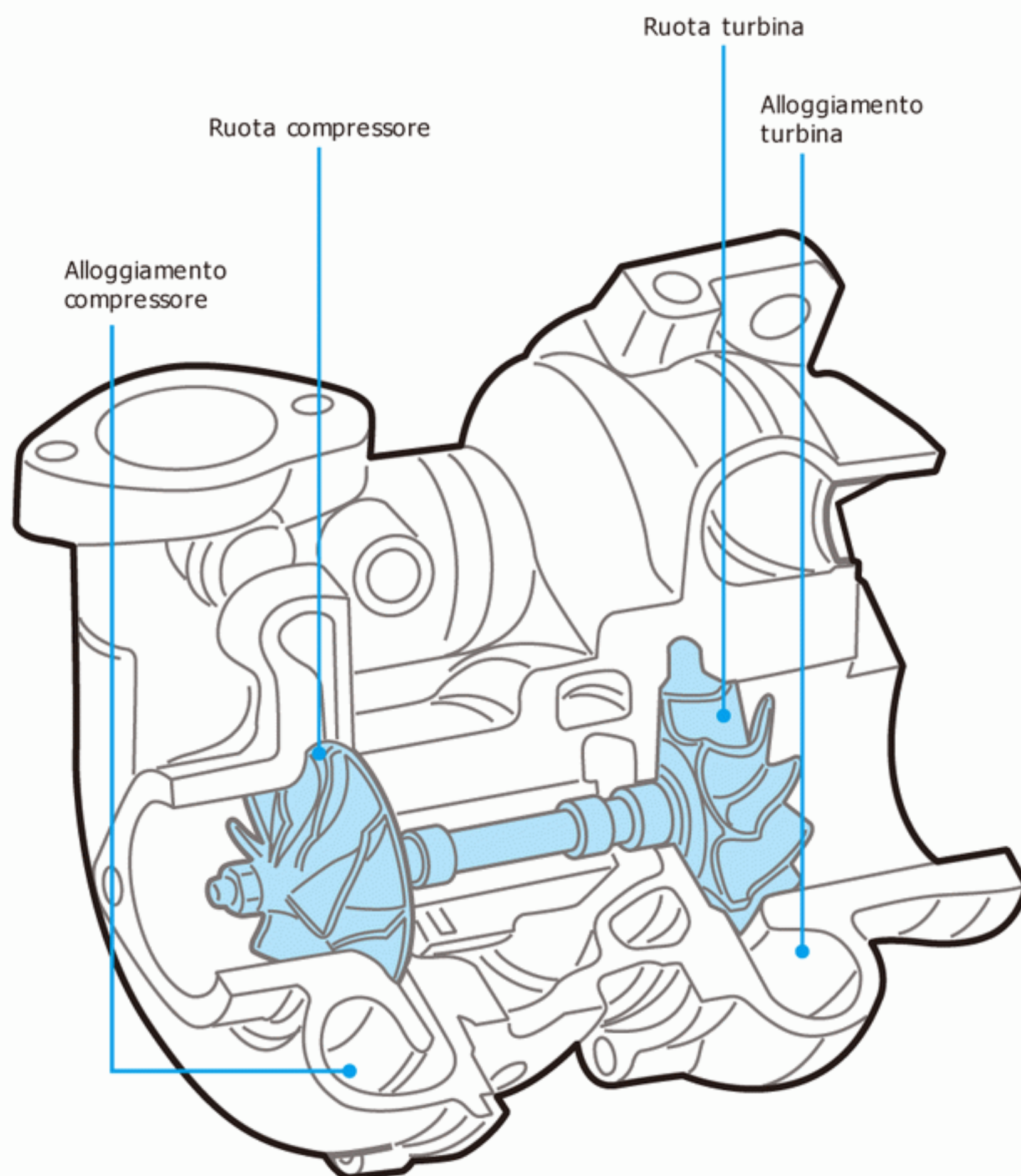
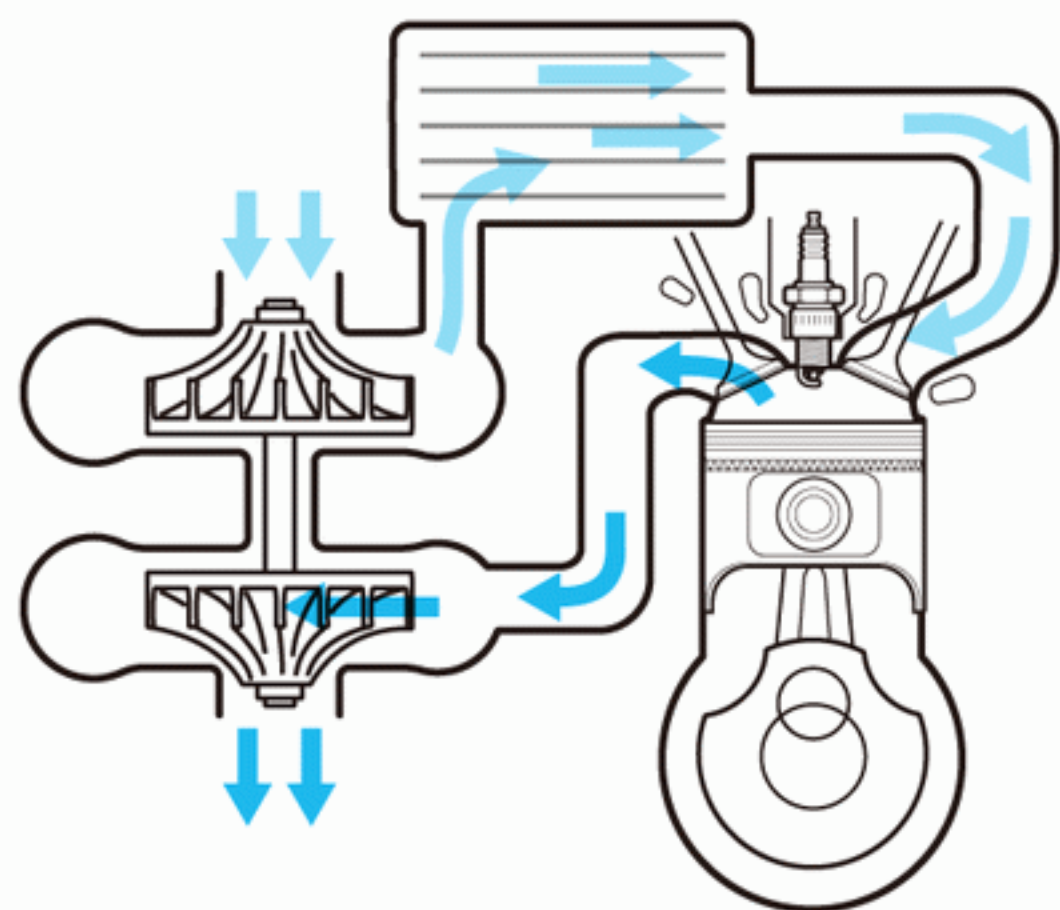
Turbocompressori

Così chiamati "in onore" della turbina che li alimenta, i turbocompressori sfruttano i gas di scarico per far ruotare tale turbina, eliminando quindi il problema della perdita di potenza ad alti regimi che affligge i compressori volumetrici. In compenso, la turbina non funziona a bassi regimi, quando vengono generati pochi gas di scarico, e ha bisogno di tempo per entrare in rotazione. Questo ritardo nella risposta è conosciuto come "turbo lag". Si stanno sviluppando varie soluzioni per questo problema, oltre a quelle già escogitate in passato. In Europa, sempre più vetture dispongono di motori di piccola cilindrata sostenuti da un turbo, allo scopo di migliorare i consumi.

Ruota turbina

Alloggiamento turbina

Ruota compressore

Alloggiamento compressore

Sistema ibrido

Bandiera tecnica dell'industria giapponese, il sistema ibrido si propone di ridurre i consumi affiancando un motore elettrico a quello termico. Apprezzato principalmente per i suoi vantaggi ecologici, anche i grandi nomi sportivi europei hanno iniziato lo sviluppo di modelli di questo tipo, aprendo così la strada a una potenziale nuova generazione di vetture a prestazioni elevate.

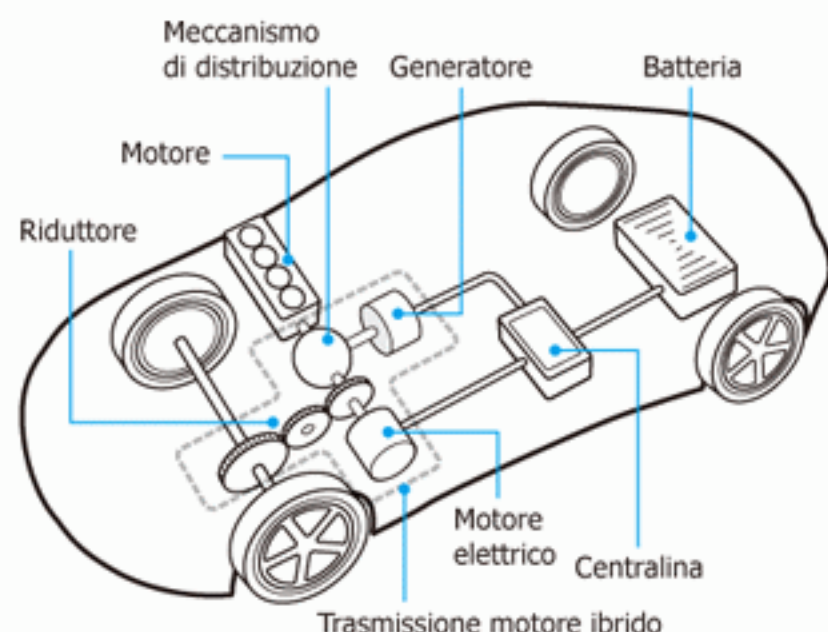
Il motore termico funziona bene in velocità, ma è poco efficiente ai bassi regimi e quando deve accelerare partendo da zero. D'altro canto, quello elettrico può erogare la coppia massima praticamente da fermo e, grazie alla sua elevata efficienza, può compensare le scarse prestazioni del motore termico ai bassi regimi. Quest'ultimo resta comunque più valido a velocità elevate: per questo le vetture ibride combinano i due sistemi per raggiungere la quadratura del cerchio.

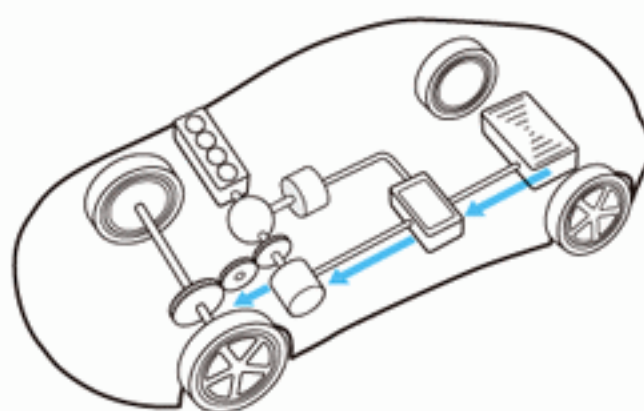
Un altro vantaggio della presenza di un motore elettrico e una batteria è che un sistema ibrido può anche sfruttare la capacità di recuperare energia. Quando l'auto decelera, con l'acceleratore non premuto, o quando è in fase di frenata, il motore agisce come un generatore azionato dalla rotazione delle ruote, ricaricando la batteria. Quest'energia può poi essere usata per alimentare il motore stesso. Ciò permette di generare elettricità con l'energia della frenata, che solitamente andrebbe sprecata sotto forma di calore.

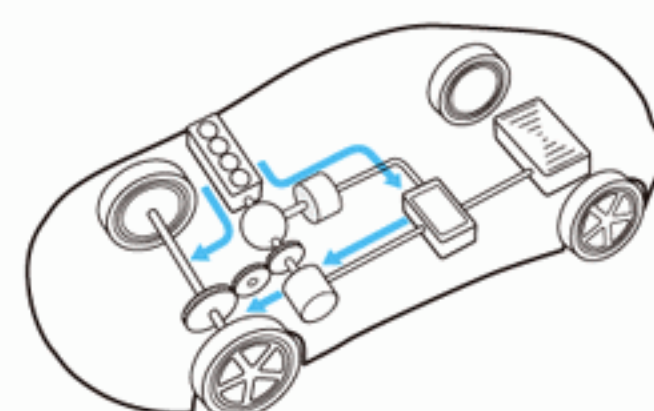
Infine, il motore elettrico può fornire una spinta aggiuntiva a quello termico, come una sorta di turbo. Questa è una soluzione sperimentata da diversi costruttori europei per eguagliare le prestazioni di veicoli con motori più grandi, utilizzando propulsori di cilindrate inferiori con l'aggiunta di un motore elettrico al posto di un sistema di sovralimentazione. I sistemi ibridi e i loro vantaggi possono differire a seconda della combinazione di motore termico ed elettrico. Esistono attualmente diversi sistemi sul mercato e il loro numero è probabilmente destinato ad aumentare. Le prime supercar ibride sono in fase di sviluppo e sarà interessante vedere quale sistema diventerà lo standard.

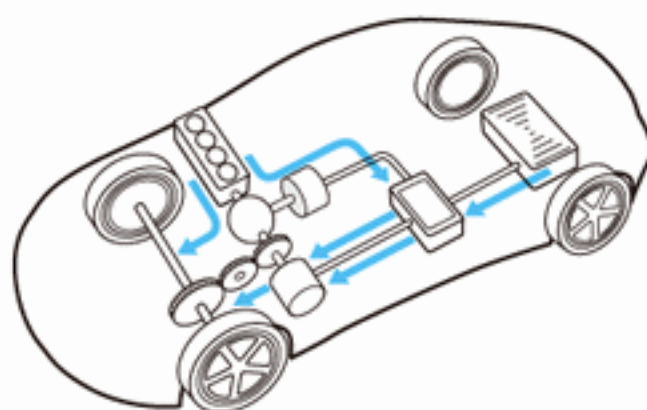
Alla guida con un motore termico e uno elettrico

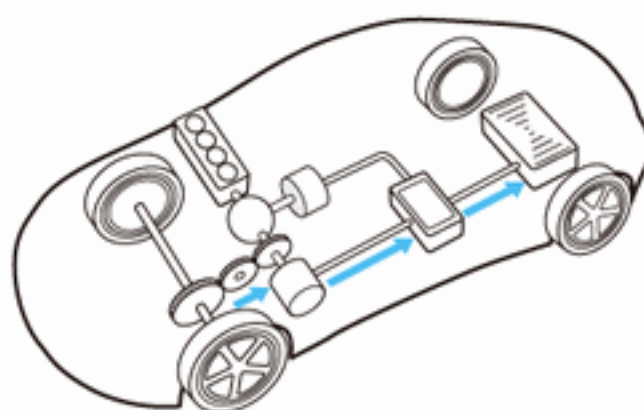
Toyota Prius

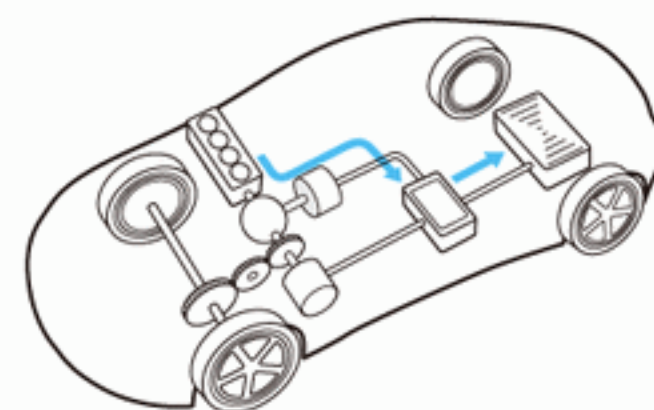
Panoramica del sistema

Avvio da fermi o a velocità basse e medie

Quando si parte da fermi o si guida a velocità medio-basse, il motore termico non è efficiente, perciò resta spento e la spinta viene fornita da quello elettrico.

Guida normale

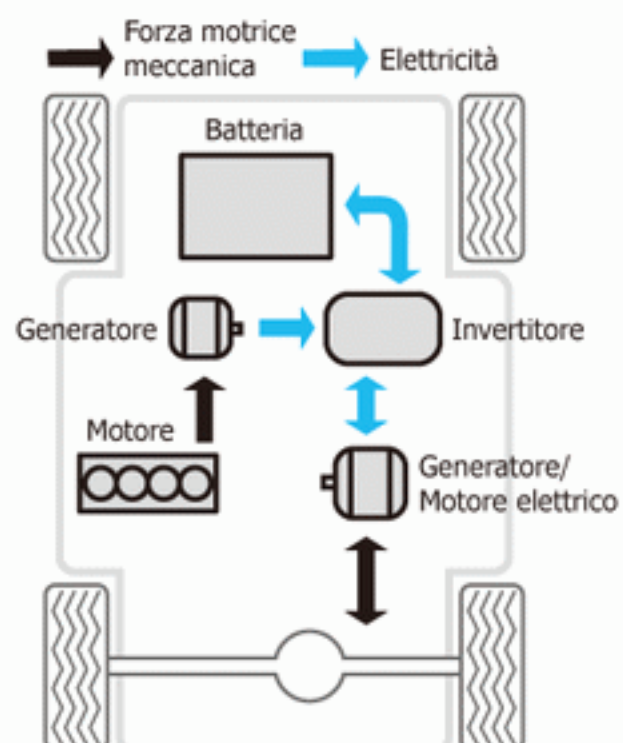
Il sistema di distribuzione riparte la potenza del motore termico fra trazione per le ruote motrici e azionamento del generatore elettrico.

Accelerazione rapida

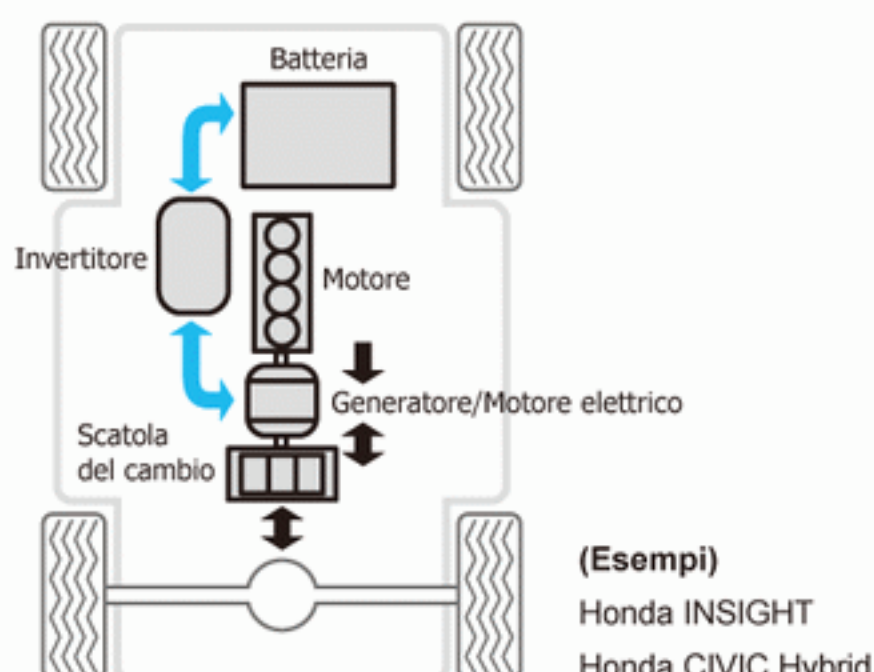
Turbo elettrico. La potenza del motore termico si combina con quella del motore elettrico, garantendo una buona risposta e un'accelerazione più morbida.

Decelerazione e frenata

Le ruote alimentano il motore elettrico, che funziona come un generatore, trasformando l'energia di frenata della vettura in elettricità e ricaricando la batteria (un processo detto anche "frenata rigenerativa").

Carica della batteria

La batteria è progettata per mantenere un livello costante di carica: se è bassa, il motore termico si avvia, ricaricando la batteria attraverso il generatore di corrente.

Tipi di sistemi ibridi

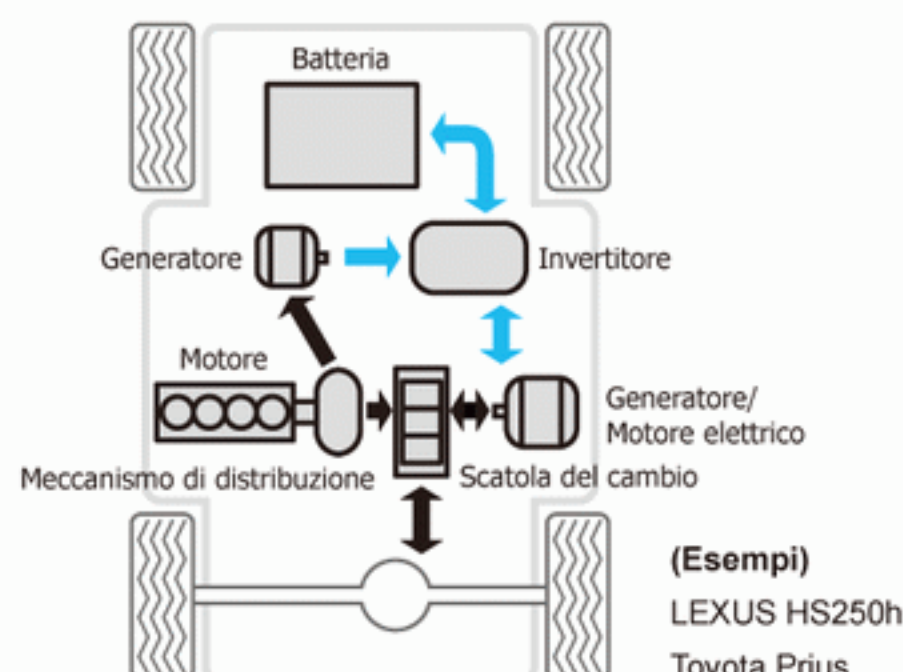
Ibrida in serie

Il motore termico serve solo ad avviare il generatore, mentre la trazione è assicurata interamente dal motore elettrico. Il sistema è semplice e il motore termico può essere collocato in qualsiasi posizione. In sostanza, è una vettura elettrica con a bordo un generatore.

Ibrida in parallelo

Il motore termico e quello elettrico funzionano in parallelo. Il motore elettrico è generalmente posto tra quello termico e il cambio, con grandi vantaggi per l'efficienza. Il piccolo motore termico ha ancora un ruolo principale nella trazione: lo scopo del motore elettrico è assisterlo, nel tentativo di combinare prestazioni di guida ed efficienza dei consumi.

Ibrida in serie-parallelo

Conosciuta anche come ibrida a potenza ripartita, dato che la potenza viene suddivisa fra motore termico e motore elettrico grazie a un ingranaggio planetario. Il motore elettrico assicura la spinta all'avvio e alle basse velocità, mentre quello termico subentra nella marcia normale a un regime di giri ottimale, azionando il generatore e ricaricando la batteria.

(Esempi)
Honda INSIGHT
Honda CIVIC Hybrid

(Esempi)
LEXUS HS250h
Toyota Prius

Specifiche: parole chiave

Le specifiche di una vettura presentano spesso una lunga serie di numeri e termini specializzati che è importante conoscere per comprendere al meglio le sue caratteristiche e capacità.

Il potenziale di un motore è definito da cinque fattori di base. Alcuni, come "potenza" e "coppia", potrebbero suonare familiari, ma vale la pena esaminarli per capire cosa significano in termini di prestazioni di una vettura.

Potenza

La potenza indica l'erogazione massima raggiungibile dal motore e viene generalmente misurata in "ps" o "CV". Ciascun CV corrisponde alla potenza necessaria per sollevare 75 kg di peso a un metro d'altezza in un secondo. Se un motore sviluppa 100 CV di potenza massima, significa che potrà sollevare una tonnellata per 7,5 metri in un secondo. La potenza viene calcolata moltiplicando la coppia per i giri del motore, perciò anche un motore di piccola cilindrata può avere una buona potenza se i giri sono sufficienti. In ambiente internazionale, la potenza può anche essere enunciata in kW (1 CV = 0,735 kW).

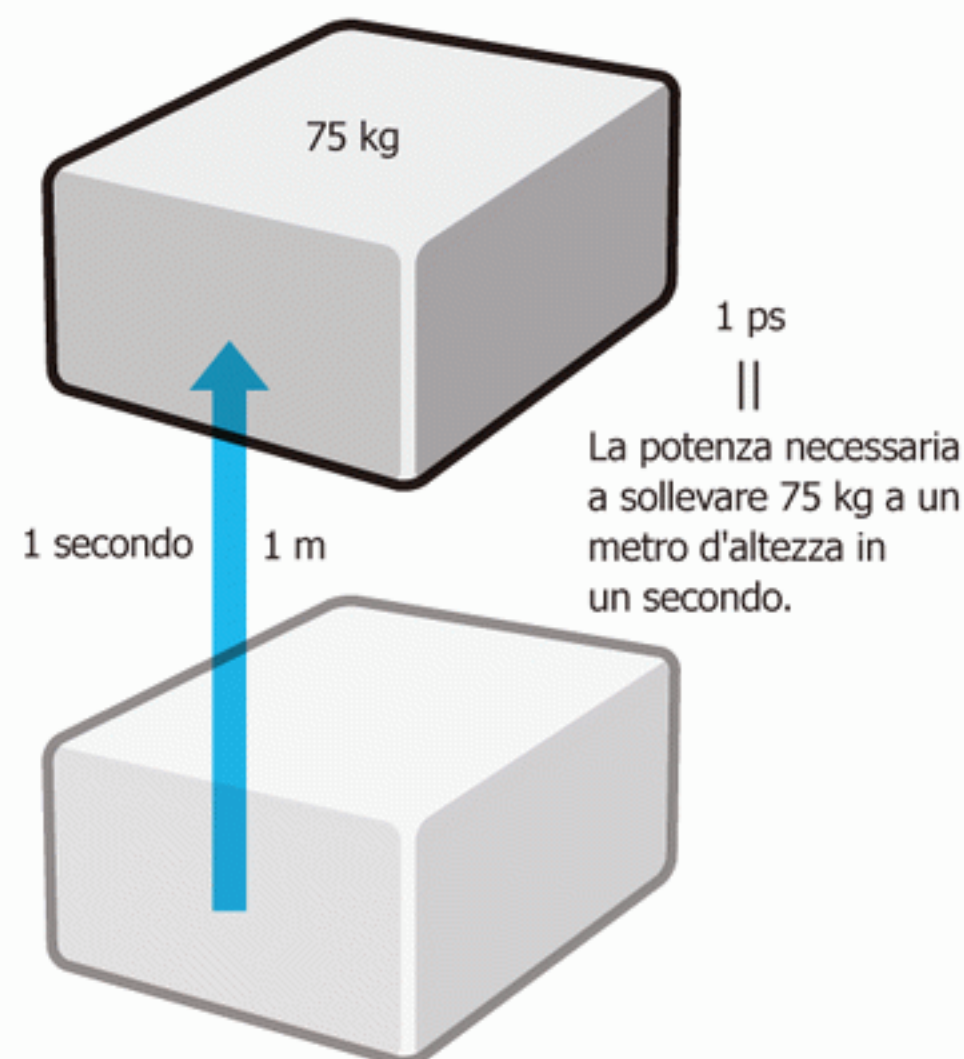
75 kg

1 ps

||

La potenza necessaria a sollevare 75 kg a un metro d'altezza in un secondo.

1 secondo

1 m

Coppia

La coppia misura la forza di una rotazione: per esempio, l'utilizzo di 1 kg di potenza per avvitare un dado con una chiave inglese lunga un metro produce una forza di 1 kg-m. In termini di motore, la coppia descrive l'intensità della forza che agisce per far girare l'albero a gomiti.

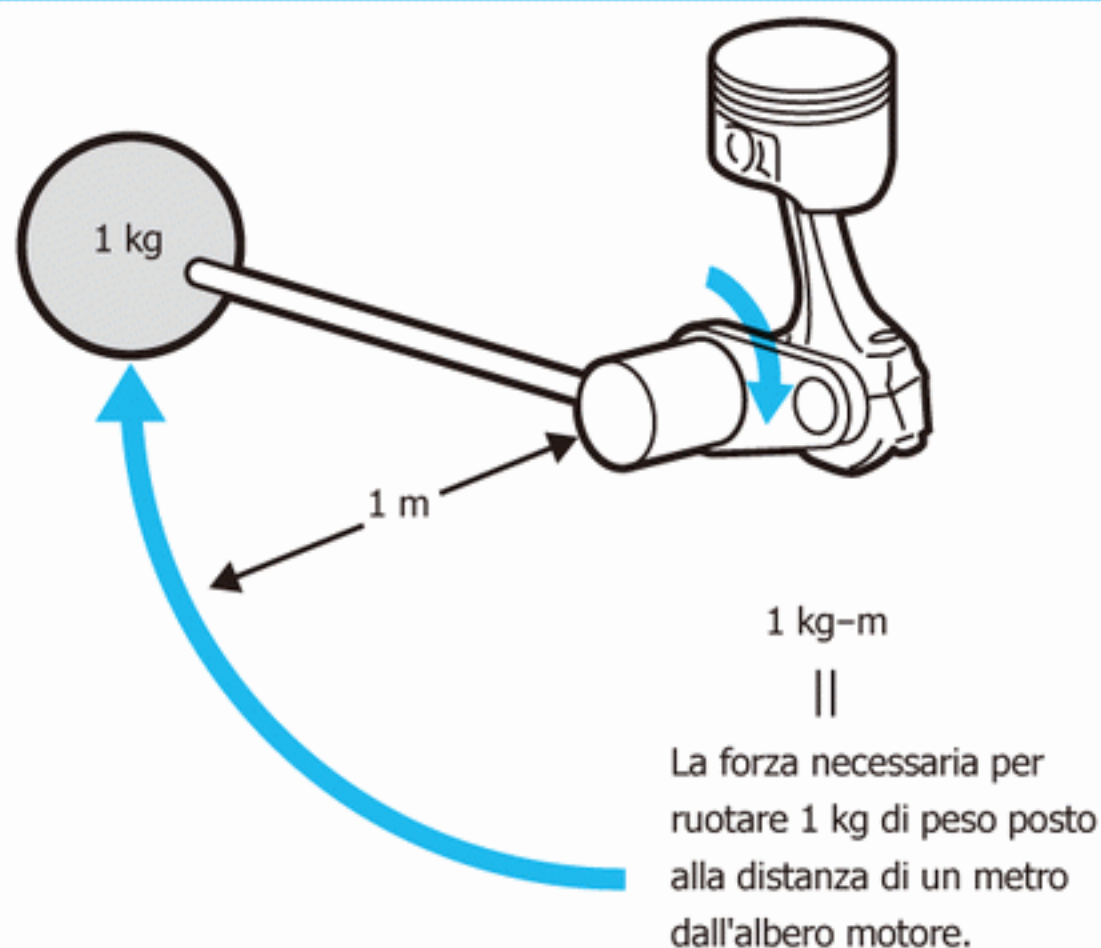
Maggiore è la coppia di un motore, maggiore è la forza che ne sostiene la rotazione e più facile è per il pilota controllare il motore.

1 kg

1 m

1 kg–m

||

La forza necessaria per ruotare 1 kg di peso posto alla distanza di un metro dall'albero motore.

Cilindrata e cilindri

La cilindrata indica il volume di miscela aria-benzina immessa in un motore. In un motore di tipo alternativo si calcola moltiplicando l'area della sezione del cilindro per la corsa del pistone e per il numero dei cilindri.

Con una cilindrata unitaria maggiore, cioè con cilindri più grandi, la potenza cresce ma diventa meno fluida. Con un frazionamento maggiore, cioè un maggior numero di cilindri, la spinta sull'albero a gomiti è più distribuita e, pertanto, più morbida.

In generale, la cilindrata unitaria dovrebbe essere compresa tra 350 cc e 600 cc, ma la decisione finale dipende dalle dimensioni e dal tipo della vettura (i motori con più cilindri sono anche più costosi).

Rapporto alesaggio/corsa

Il rapporto alesaggio/corsa è la relazione che intercorre tra il diametro del cilindro e la lunghezza del movimento del pistone al suo interno. I motori con un rapporto inferiore a 1:1 sono noti come motori a "corsa breve", mentre quelli con un rapporto superiore a 1:1 sono detti motori a "corsa lunga". Un rapporto esatto di 1:1 si definisce "quadro". Il rapporto alesaggio/corsa influisce sul comportamento del motore. In generale, un motore a corsa lunga può produrre coppia a regimi bassi e medi, essendo però meno efficace a quelli elevati, mentre l'inverso vale per un motore a corsa breve.

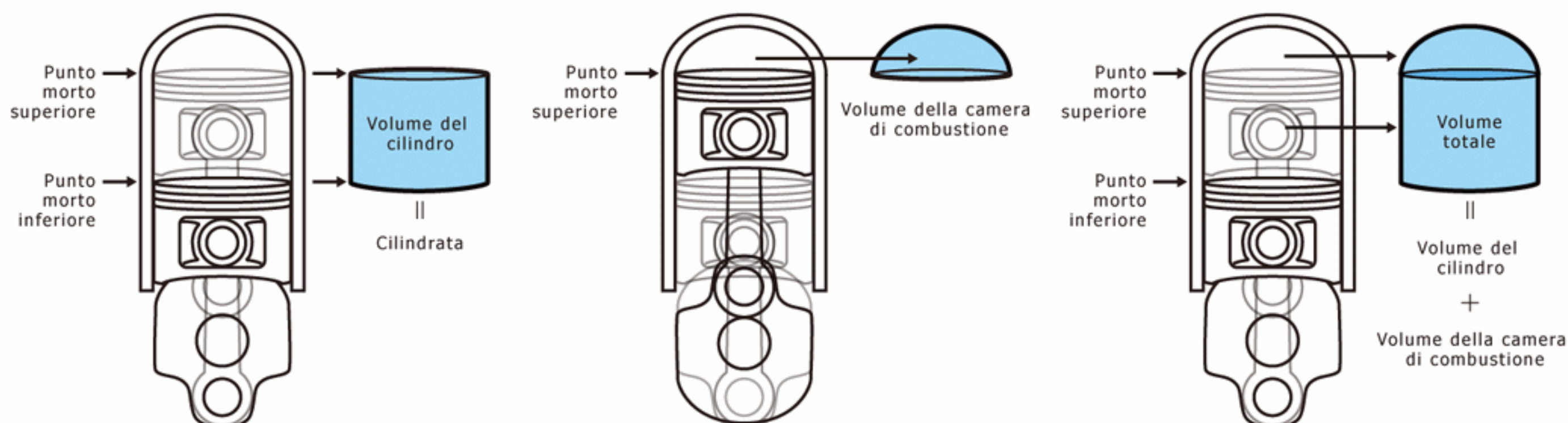
È inoltre utile sapere che la posizione del pistone alla sommità del cilindro viene chiamata "punto morto superiore", mentre quella alla sua base è nota come "punto morto inferiore".

Rapporto di compressione

Il rapporto di compressione indica la quantità di miscela aria-benzina introdotta nel motore durante la compressione e incide fortemente sulla potenza del motore.

Il rapporto di compressione viene calcolato dividendo il volume del cilindro completamente aperto ("volume totale del cilindro") per il volume quando è completamente chiuso ("volume della camera di combustione"). Il volume totale del cilindro è dato dalla somma della cilindrata e del volume della camera di combustione.

Per esempio, un motore quattro cilindri 2.000 cc ha 500 cc per cilindro. Se il volume della camera di combustione è di 50 cc, il volume totale del cilindro è di 550 cc. Dividendo questo valore per il volume della camera di combustione (50 cc), si ottiene un rapporto di compressione pari a undici.

In generale, i motori aspirati hanno un rapporto di compressione compreso tra nove e undici. Un rapporto di compressione superiore a dieci produce una potenza elevata rispetto alla cilindrata. I motori che presentano dispositivi di sovralimentazione mostrano un rapporto di compressione compreso tra sette e nove.

Trasformare la potenza in velocità

Cambio e trazione sono necessari per trasformare la potenza in velocità. Le singole parti della trasmissione hanno un enorme impatto sulla prestazione di guida.

Cambio

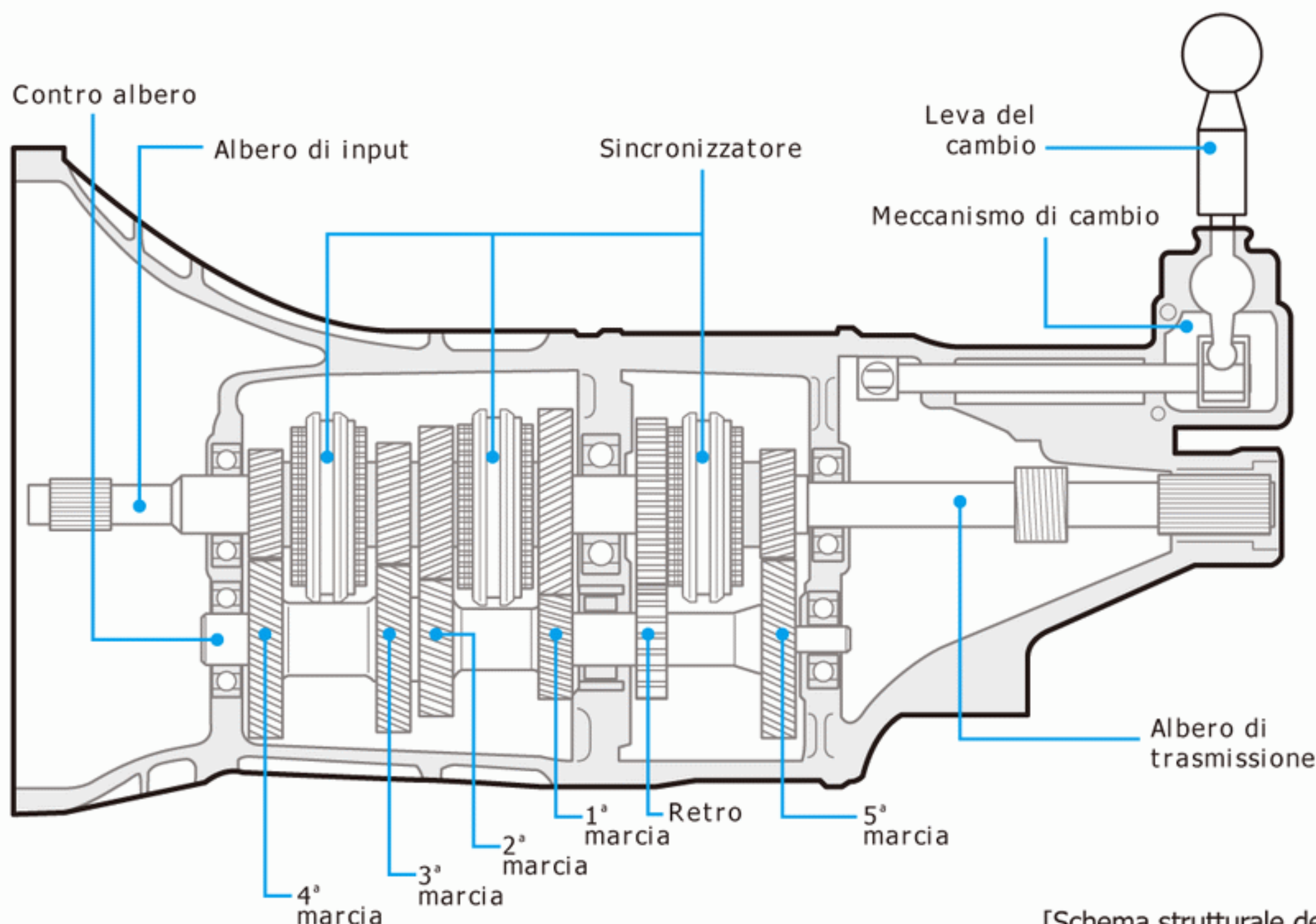
Un motore compie tra le centinaia e le migliaia di rotazioni al minuto, una velocità eccessiva per azionare direttamente le ruote e tale da rendere necessaria la presenza di un meccanismo intermedio. Qui entra in gioco il cambio: grazie alle sue marce, il cambio consente di trasferire il giusto quantitativo di potenza e velocità alle ruote, in ogni situazione.

Per comprendere questo meccanismo, dobbiamo pensare al funzionamento degli ingranaggi. Quando un ingranaggio piccolo ne spinge uno più grande, quest'ultimo ruota più lentamente ma ha una coppia maggiore. Se invertiamo i ruoli, l'ingranaggio piccolo ruoterà più velocemente ma avrà una coppia minore.

Il cambio sfrutta questo principio per offrire marce adatte per ogni situazione. Un'auto richiede la massima potenza nella partenza da ferma, mentre per mantenere una velocità costante ne basta poca. Per questo, quando si accelera da zero, si usa un ingranaggio grande (a bassa rotazione ed elevata potenza) per trasmettere potenza sufficiente a muovere l'auto.

Un ingranaggio grande genera molta coppia, ma ruota lentamente. Questo significa che, in prima, la velocità massima sarà limitata a poche decine di chilometri orari, anche accelerando al massimo. Ed è per questo che esistono diversi ingranaggi, sempre più piccoli salendo di marcia, che producono via via più velocità e meno coppia. La possibilità di spostarsi fra questi ingranaggi consente al pilota di scegliere sempre quello adatto a ogni situazione.

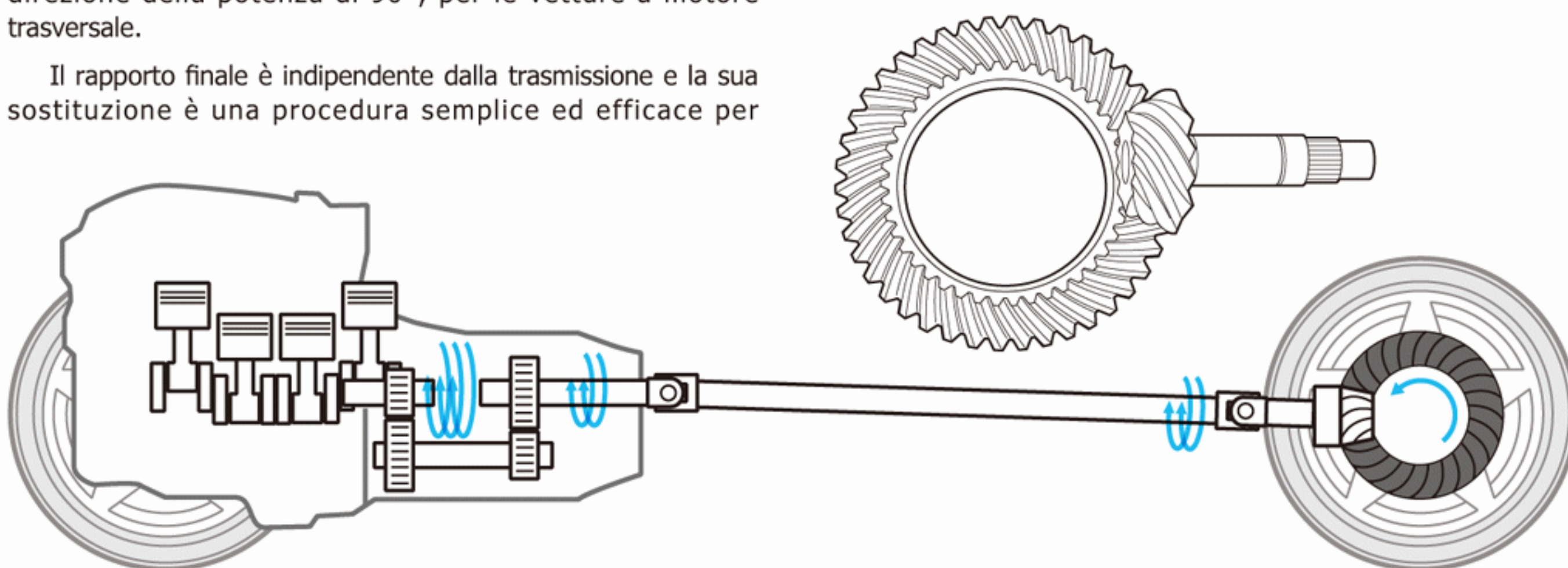
Su una vera auto, oltre agli ingranaggi del cambio collegati direttamente al motore, il rapporto globale viene determinato unitamente a un ulteriore "ingranaggio finale", situato fra il cambio e le ruote motrici. Il rapporto ha una notevole influenza sulle caratteristiche di guida di una vettura e, specialmente nelle gare su pista, è un fattore determinante per ottenere un buon tempo.

Contro albero
Albero di input
Sincronizzatore
Leva del cambio
Meccanismo di cambio
Albero di trasmissione
1ª marcia
Retro
5ª marcia
2ª marcia
3ª marcia
4ª marcia

[Schema strutturale del cambio manuale]

Sfruttare al meglio la potenza

Rapporto finale

Il "rapporto finale" è l'ultimo ingranaggio che consente di trasmettere la potenza dal motore alle ruote motrici. È l'ultima fase della catena di processi che adatta i giri del motore alla velocità più consona a muovere le ruote, oltre a ruotare la direzione della potenza di 90°, per le vetture a motore trasversale.

Il rapporto finale è indipendente dalla trasmissione e la sua sostituzione è una procedura semplice ed efficace per modificare il comportamento della vettura. Nelle sportive è generalmente elevato, in modo da consentire buone accelerazioni, mentre può essere ridotto per contenere i consumi.

Tipi di cambio a due pedali

AT

► Cambio automatico

È il cambio più comune in questa categoria e utilizza un convertitore di coppia per cambiare marcia automaticamente a seconda della velocità e dei giri. Questo sistema, basato su ingranaggi planetari controllati dalla pressione idraulica, consente un passaggio di marcia fluido, ma slittamenti e perdite del meccanismo possono portare a consumi più elevati.

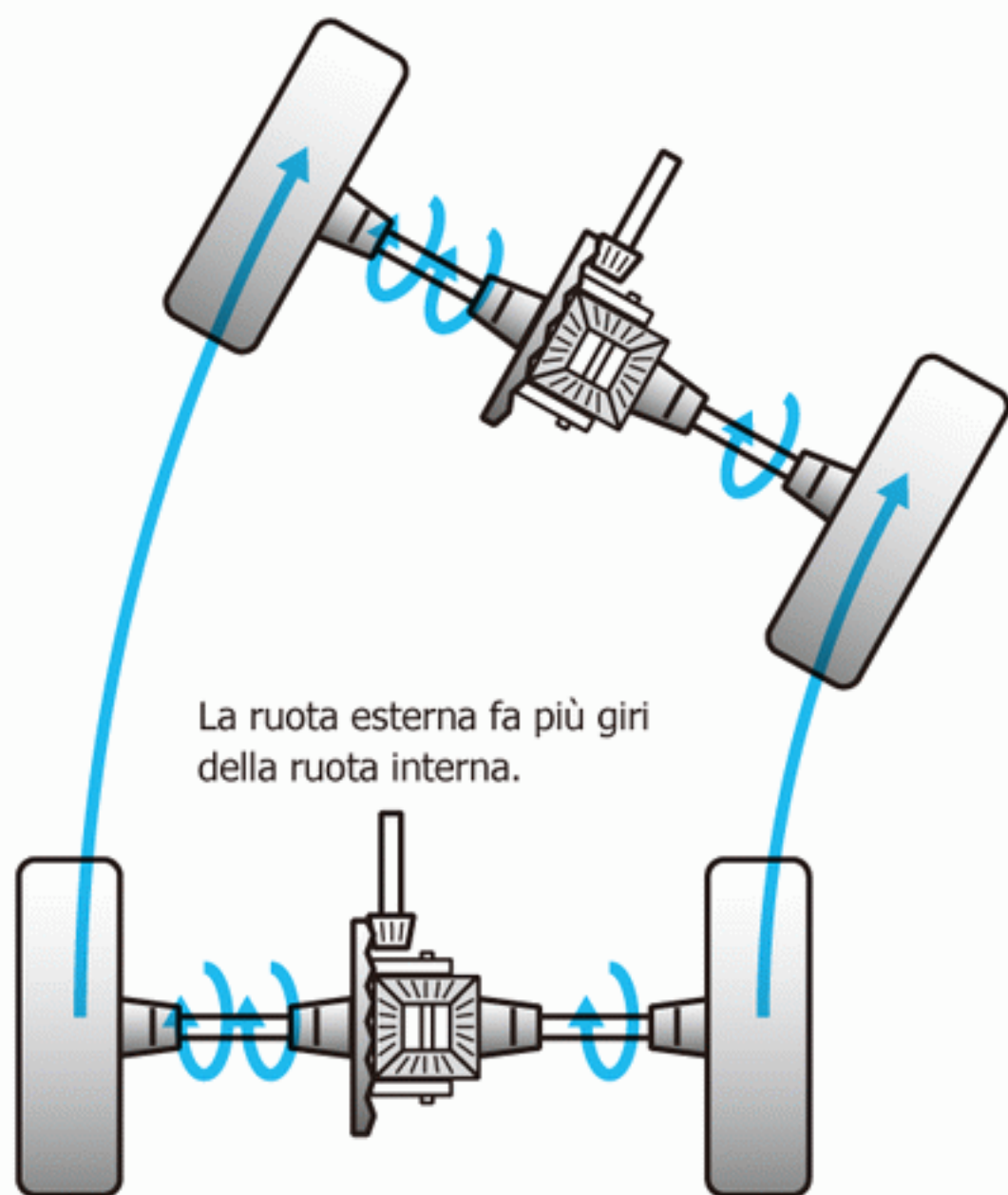
CVT

► Cambio a variazione continua

Il cambio a variazione continua non passa da una marcia all'altra come un normale cambio, ma utilizza una cinghia o catena metallica collegata a due pulegge o dischi per offrire una transizione impercettibile da un qualsiasi rapporto di marcia all'altro. Offre una guida molto fluida, senza sobbalzi dovuti ai cambi di marcia, e permette al motore di funzionare sempre alla massima efficienza.

Cambio a doppia frizione (DCT)

► Trasmissione a doppia frizione

Il cambio a doppia frizione è un cambio manuale regolato da due frizioni, che viene in tal modo impostato in automatico. Le due frizioni gestiscono rispettivamente le marce dispari e quelle pari, consentendo una transizione immediata e una forte riduzione dei tempi di cambiata rispetto al cambio manuale. A differenza del cambio automatico, dove il regime massimo del motore risulta limitato dagli ingranaggi planetari, un cambio a due frizioni può essere utilizzato con regimi elevati. È un sistema destinato a svilupparsi, grazie agli impieghi nel campo delle vetture sportive ed ecologiche, ma anche nelle utilitarie.

I pignoni permettono rotazioni diverse tra ruota destra e ruota sinistra.

Dal motore

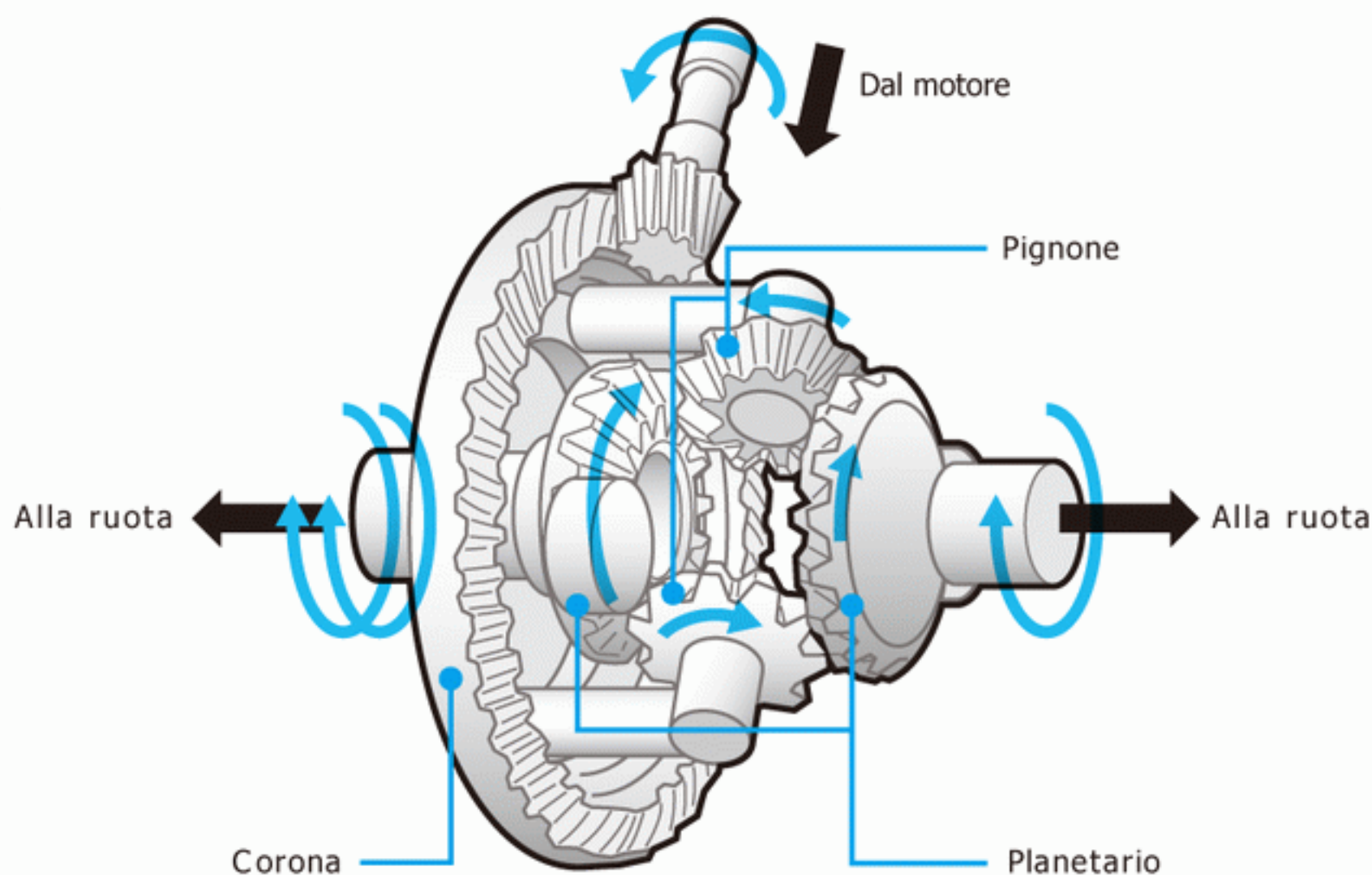
Pignone

Alla ruota

Alla ruota

Corona

Planetario

La ruota esterna fa più giri della ruota interna.

Differenziale

Il differenziale è essenziale per garantire la motricità su entrambi i lati dell'auto. Finché la vettura viaggia in rettilineo, il differenziale resta inattivo, ma la sua presenza diventa fondamentale non appena si entra in una curva.

Nelle curve, infatti, le ruote sul lato esterno coprono più terreno di quelle interne: se non possono girare a velocità diverse, le ruote interne tenderanno a slittare, rendendo la curva difficoltosa. Questo problema è risolto dal differenziale, un ruotismo integrato con la riduzione finale e situato tra le ruote motrici.

Come si nota dal diagramma in alto a destra, la potenza del motore viene trasmessa dalla riduzione finale alla corona, a cui sono fissati due pignoni che fanno ruotare due planetari, che a loro volta trasmettono potenza alle ruote destra e sinistra.

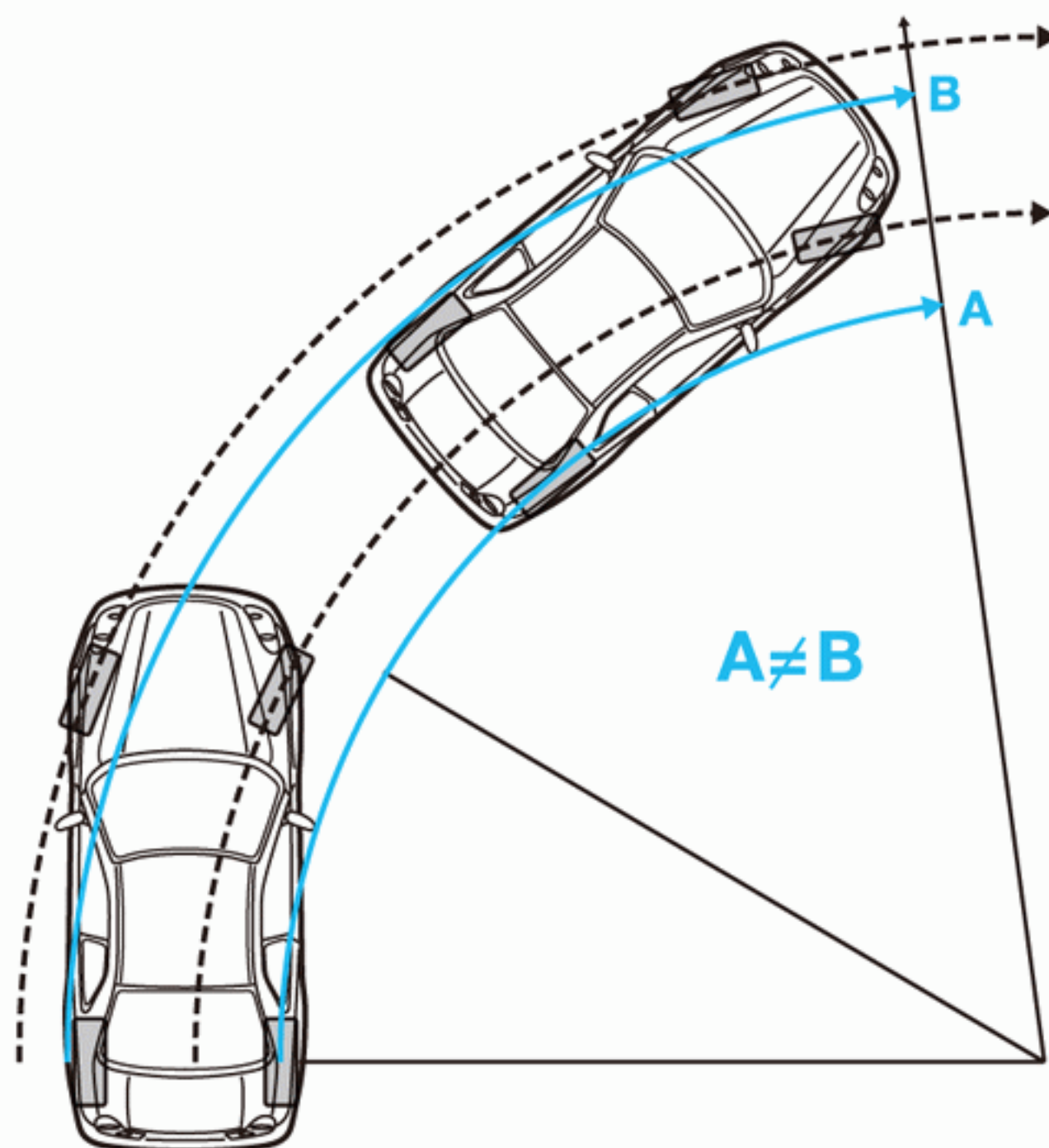
Quando l'auto viaggia in rettilineo, la trasmissione aziona la corona e i pignoni trasmettendo la potenza egualmente ai due planetari. In una situazione come questa, le ruote destra e sinistra hanno esattamente la stessa velocità.

In curva, invece, la ruota interna genera resistenza, che viene trasmessa al planetario corrispondente: quando questo accade i pignoni, rimasti solidali con i planetari nella marcia rettilinea, iniziano a ruotare per permettere lo svilupparsi di una differenza nella velocità di rotazione tra le due ruote.

Questo significa che viene trasmessa meno potenza alla ruota interna, che incontra resistenza, e una potenza leggermente maggiore alla ruota esterna, che copre una traiettoria maggiore. In questo modo, ciascuna ruota avrà la velocità corretta per percorrere la curva.

B

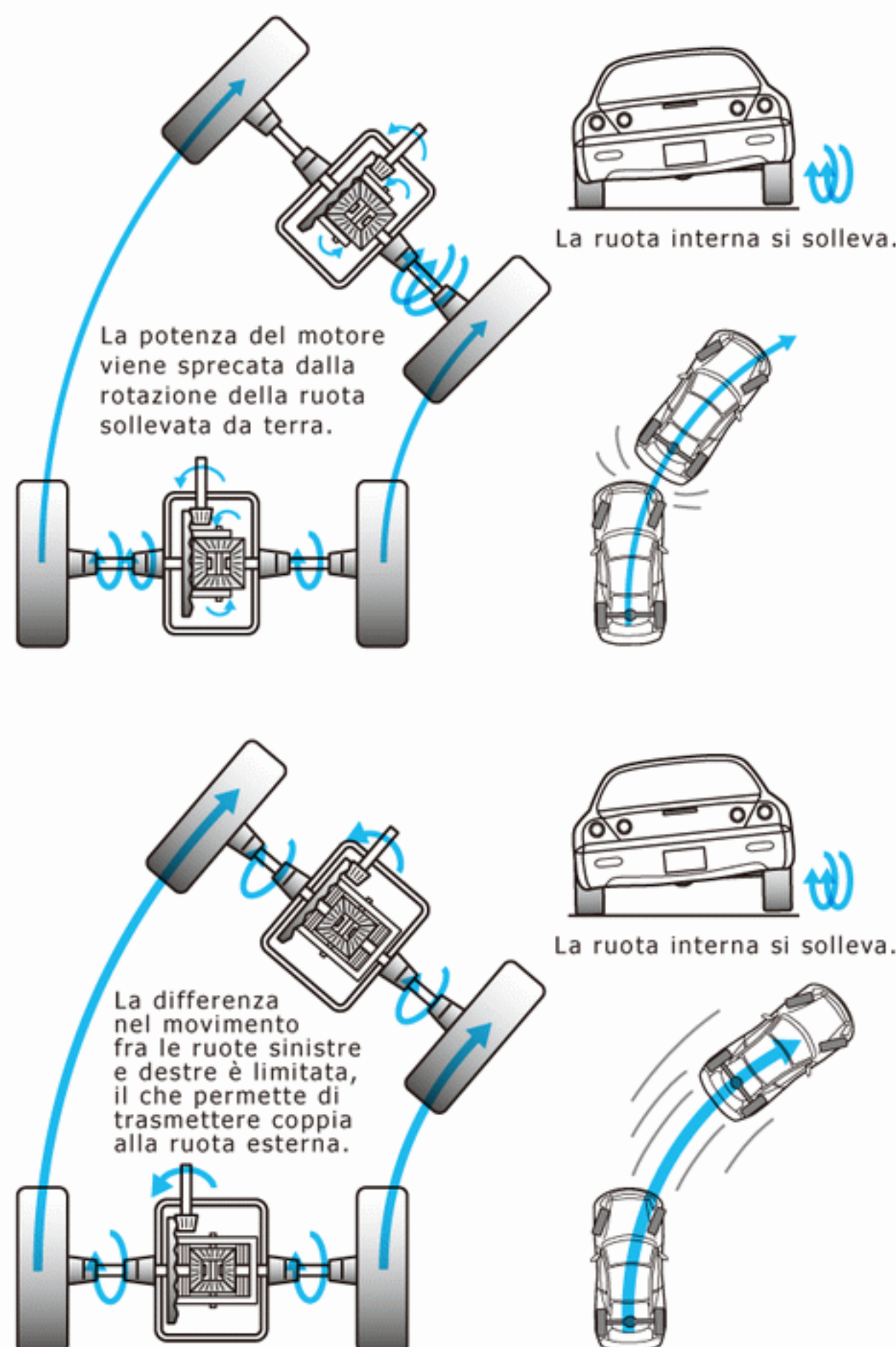
A

A≠B

Curve morbide ma decise

Differenziale autobloccante

Il differenziale, in curva, ha un problema specifico: quando una ruota motrice perde completamente aderenza con il fondo stradale, il differenziale non incontra più resistenza e trasmette l'intero momento torcente su quel lato, facendola ruotare vorticosamente, mentre l'altra non avrà alcuna potenza. Questo perché il differenziale tenta di correggere la differenza nella velocità di rotazione, trasferendo tutta la forza motrice sulla ruota sollevata. Questo problema si verifica anche in condizioni di ghiaccio e neve, quando la perdita totale di trazione di una singola ruota motrice la fa girare a vuoto.

Il differenziale autobloccante (LSD) è progettato per sopprimere la funzione del differenziale quando la differenza di velocità di rotazione tra le ruote motrici destra e sinistra è superiore a un certo livello. L'idea alla base del sistema LSD è assicurare la corretta distribuzione della potenza sulle ruote motrici, utilizzando un dispositivo per limitare la differenza nella velocità di rotazione sui due lati. I metodi utilizzati per raggiungere quest'obiettivo sono diversi: sistemi multi-frizione, sistemi a controllo elettronico e sistemi che utilizzano una frizione a giunto viscoso.

Nelle auto sportive, il differenziale autobloccante viene usato non tanto per riuscire a sfuggire a neve e fango, quanto per assicurare un uso efficace della potenza del motore e migliorare la tenuta.

Tipi di differenziali autobloccanti

Sensibili alla coppia

Questo sistema usa ingranaggi speciali, che compensano le differenze di coppia aumentando la propria resistenza e ponendo un limite alla differenza generata. Questi sistemi possono limitare rigidamente la differenza di rotazione tra le ruote e hanno tempi di risposta molto brevi, perciò sono particolarmente apprezzati in condizioni estreme, come nella guida su circuito. Ci sono molti tipi di differenziali autobloccanti sensibili alla coppia, che vanno da quello multidisco, all'elicoidale, al Torsen.

Sensibili alla velocità

Questi sistemi generalmente limitano il differenziale utilizzando olio a base di silicone ad alta viscosità, invece che ingranaggi. I più diffusi sono i sistemi di tipo viscoso, che usano la resistenza laminare dell'olio, ma vi sono anche i sistemi "a orifizio" che sfruttano la resistenza dell'olio nell'attraversare piccole perforazioni. Questi sistemi non possono imporre limiti tanto rigidi quanto i sistemi sensibili alla coppia e non rispondono altrettanto prontamente, ma sono più facili da controllare su un fondo a bassa trazione.

A controllo attivo

Sistemi a controllo elettronico che usano una centralina per raccogliere ed elaborare i dati dei sensori e controllare la differenza di rotazione. Sono spesso adottati sulle vetture da gara, specie nei rally WRC, e ormai anche da alcuni veicoli commerciali. La limitazione del differenziale viene regolata modulando la pressione tra piastre di attrito, mediante frizioni idrauliche o elettromagnetiche.

CARROZZERIA

CAPITOLO 02 Meccanica

Il telaio, la colonna portante

Forma e struttura del corpo vettura influenzano le prestazioni tanto quanto motore e cambio, determinando la manovrabilità.

Specifiche di prestazione del corpo vettura

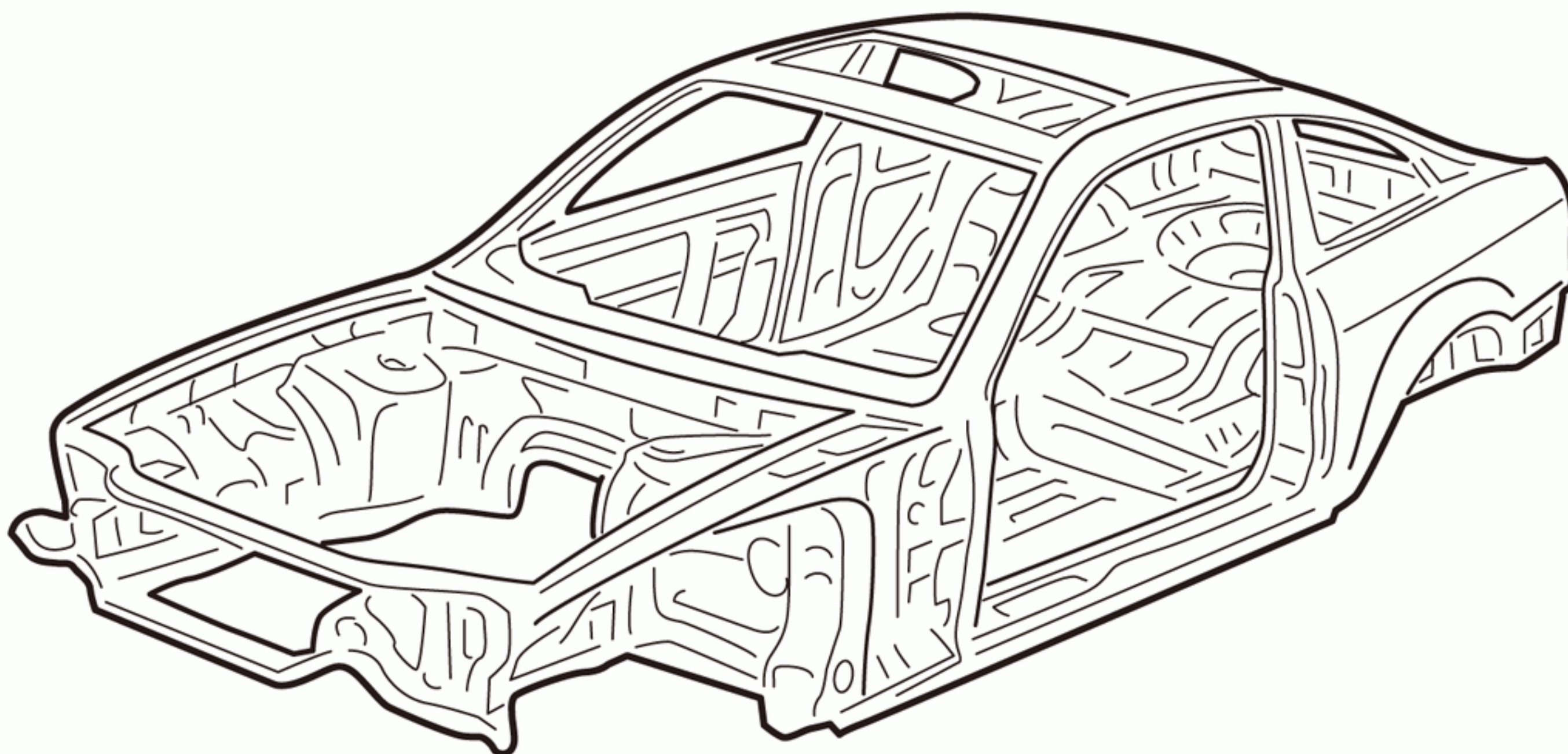
Assieme a motore e sospensioni, il corpo vettura costituisce la base del comportamento dell'auto durante la guida. Un buon corpo vettura deve essere rigido per resistere alle deformazioni e resistente per non spezzarsi, ma deve anche essere sufficientemente leggero. Il modo migliore per pensare a rigidità e robustezza è in termini, rispettivamente, di "resistenza alla deformazione" e "resistenza alla rottura".

In particolare, la rigidità influisce molto sulle prestazioni di guida. Per esempio, quando il carico aumenta o si sposta su un fondo irregolare o in curva, un corpo vettura rigido si piega e non si deforma.

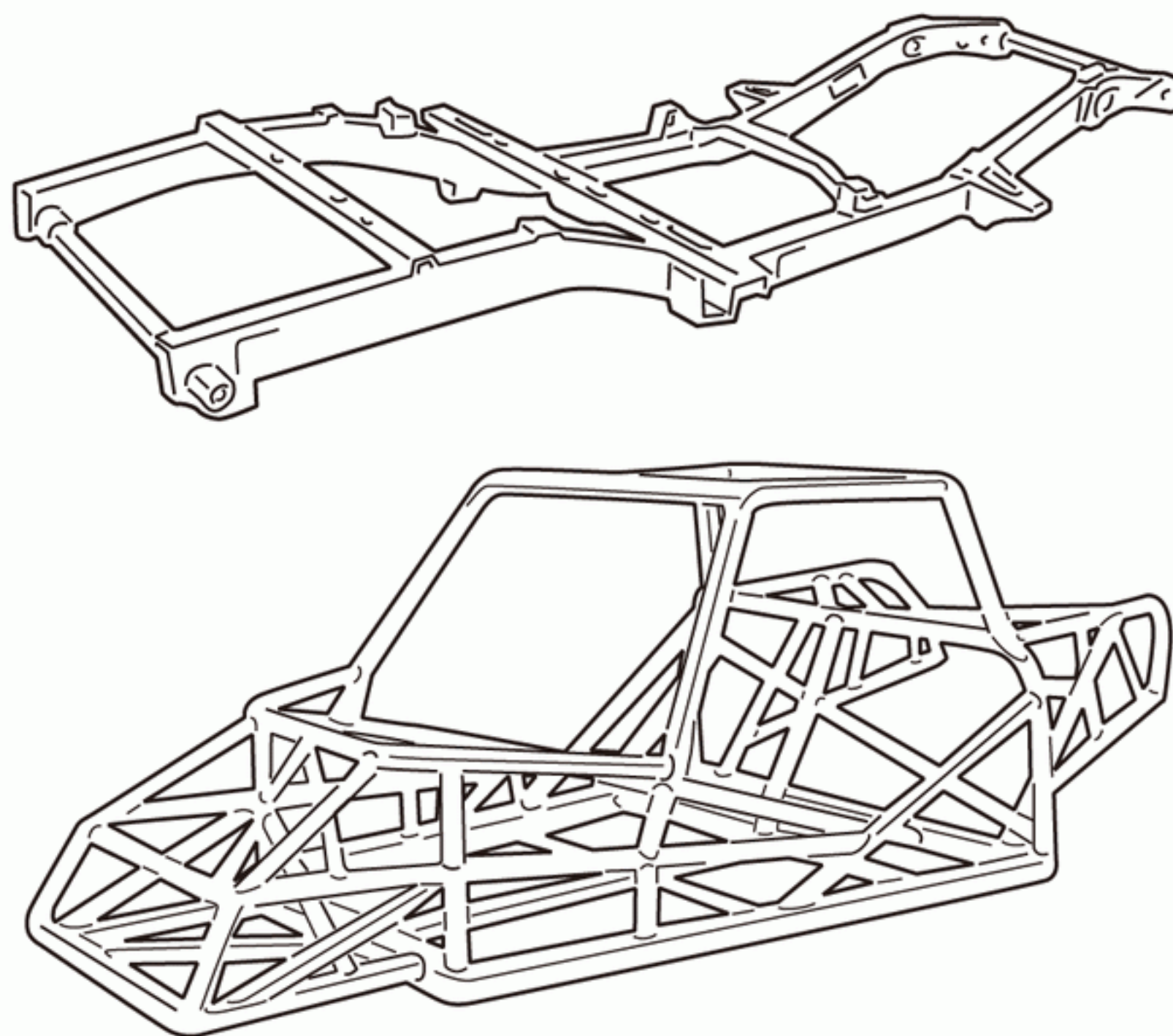
Anche se il corpo vettura si deforma, deve tornare immediatamente alla forma originale, in modo che le sospensioni agiscano normalmente e gli pneumatici mantengano l'aderenza. Un corpo vettura rigido agevola la trasmissione della potenza al fondo stradale, rende prevedibile il comportamento dell'auto e, perciò, rende facile la guida. Viceversa, se il corpo vettura si deforma facilmente, sarà più difficile trasmettere potenza alla strada e la manovrabilità ne soffrirà in modo considerevole.

Le forze che agiscono sul corpo vettura non sono costanti: alcune sono lente e graduali, altre improvvise e violente. Spesso le pubblicità vantano la rigidità di un'auto in curva o alla torsione, ma in questo caso si parla solitamente soltanto di forze applicate lentamente: un corpo vettura efficace deve poter sostenere l'impatto di qualsiasi tipo di forza che possa presentarsi all'improvviso.

La resistenza si spiega da sé: se un'auto a bassa resistenza è soggetta a un urto, sosterrà più danni. Tuttavia, ridurre il danno non è abbastanza: un'auto a elevata resistenza deve essere costruita in modo da non trasferire l'urto dell'impatto ai passeggeri, proteggendoli.

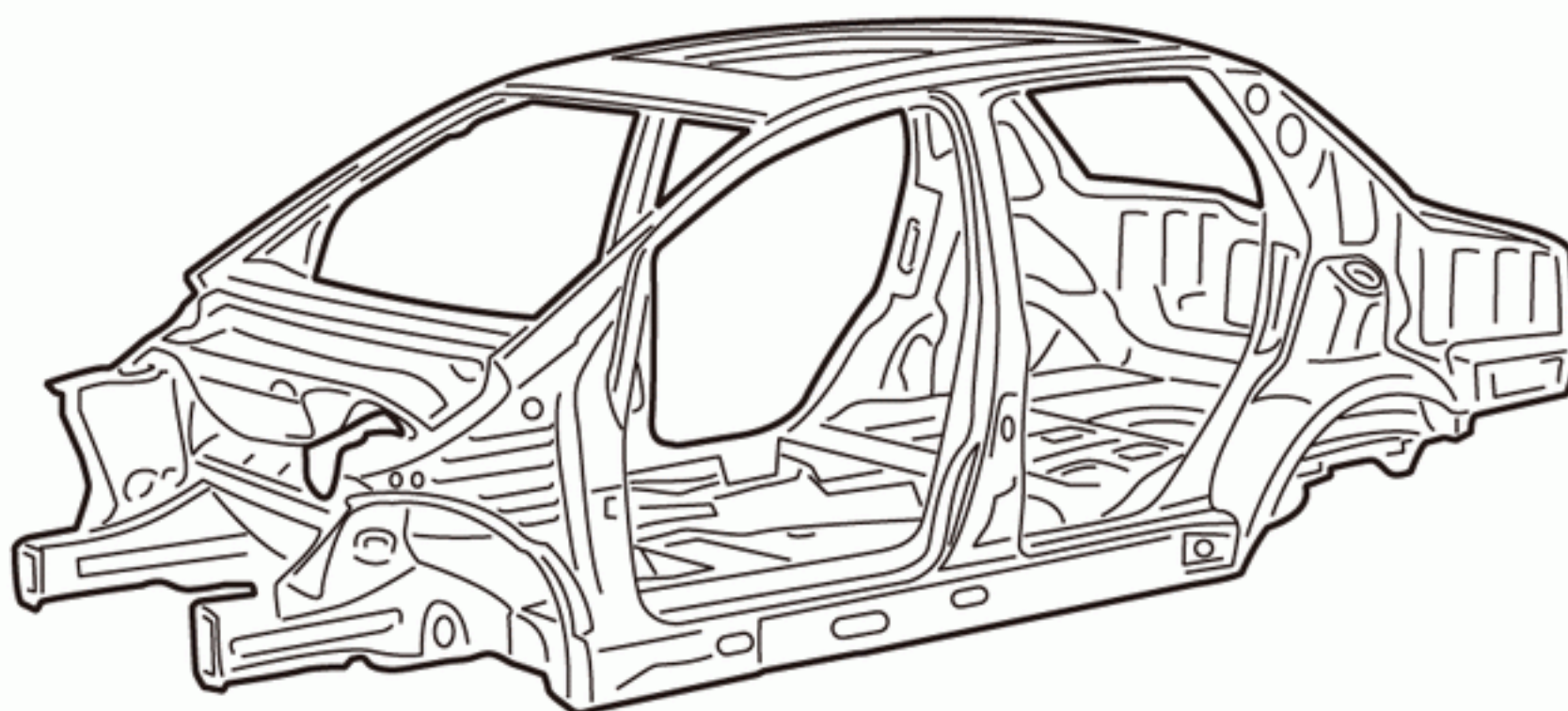
Nella situazione ideale, il corpo vettura deve raggiungere il miglior compromesso fra rigidità e resistenza. Sarebbe facile migliorare queste caratteristiche rinforzando la vettura, ma questo aumenterebbe inevitabilmente il peso. Ecco perché le decappottabili senza tettuccio, che hanno un pianale rinforzato, sono più pesanti delle vetture chiuse.

Resistenza e rigidità

Carrozzeria su telaio

In vetture con carrozzeria separata o con carrozzeria su telaio, motore, cambio, sospensioni e gli altri componenti sono fissati a un telaio, sul quale viene poi installata una carrozzeria realizzata separatamente. I telai sono di diversi tipi: a tubi, a trave centrale, perimetrale e a piattaforma. I telai a tubi sono i più semplici e i più facili da rinforzare, perciò sono i più diffusi, soprattutto sui fuoristrada. Un altro tipo di struttura, detta "telaio a traliccio", è formata da un reticolo di piccoli tubi su cui montare i pannelli della carrozzeria. Questa soluzione, una volta realizzata, non può più essere disassemblata. Offre però maggiore facilità nel raggiungere un'elevata rigidità e un corpo vettura leggero, semplificando modifiche e riparazioni. Per questo, viene spesso adottata per le auto da gara o le sportive in serie limitata.

Corpo vettura monoscocca

È il corpo vettura più comune nelle vetture moderne: combina carrozzeria e telaio in una sola unità. La resistenza del telaio si ottiene grazie all'apporto di tutti gli elementi, come i pannelli della carrozzeria, e l'insieme risulta rigido, resistente e al contempo leggero. Inoltre, consente di ridurre l'altezza da terra e di assorbire efficacemente l'energia di un impatto. I problemi iniziali di qualità di guida e rumorosità, dovuti al fissaggio diretto di motore e sospensioni alla carrozzeria, sono stati superati grazie ai progressi tecnologici nel campo delle sospensioni e del fissaggio del propulsore.

FRENI

CAPITOLO 02 Meccanica

Scambiatori termici per ridurre la velocità

Durante la frenata, i freni trasformano l'energia cinetica in calore. Perciò, oltre ad avere un buon potere di arresto, devono essere in grado di dissipare il calore in modo efficace.

Struttura e principi

Lo scopo di base dell'impianto frenante è quello di trasformare l'energia cinetica in calore per decelerare. Inoltre, impedisce all'auto di muoversi quando è parcheggiata.

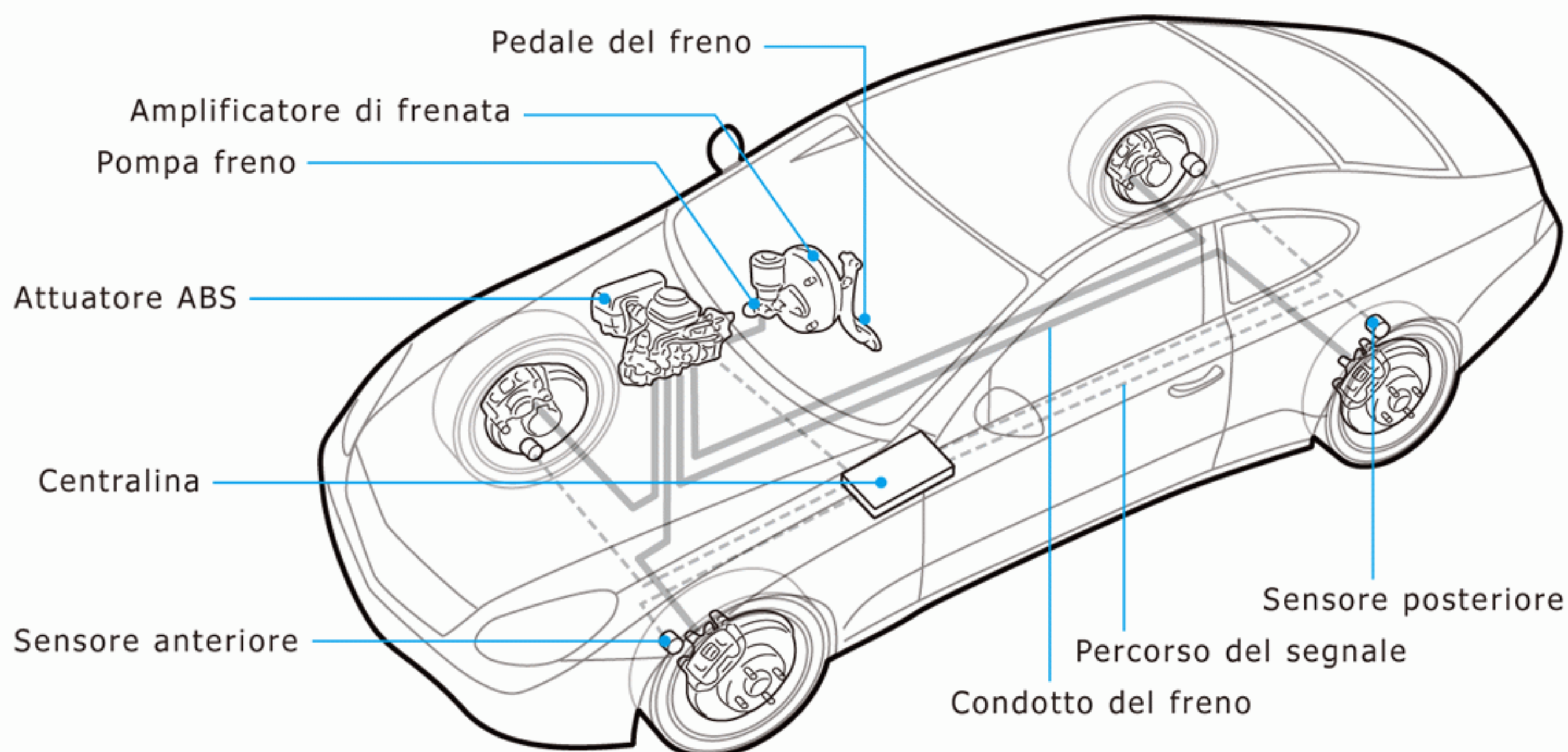
Gli elementi base dell'impianto frenante sono un dispositivo di controllo che riceve il comando del pilota, degli elementi idraulici che lo trasmettono e il meccanismo frenante vero e proprio. Negli ultimi anni, questa struttura è stata migliorata con l'introduzione di servomeccanismi che amplificano la forza del pilota e di sistemi ABS che impediscono alle ruote di bloccarsi.

Il pedale e i freni si trovano ai due capi di un circuito idraulico, al centro del quale troviamo un voluminoso cilindro. Premendo il pedale, al suo interno si crea una spinta che, grazie al principio di Pascal, aziona i freni con una forza incrementata. Le pinze o le ganasce, composte con materiali a elevata frizione, si serrano contro il disco o il tamburo del freno e creano l'attrito che trasforma l'energia cinetica in energia termica, rallentando la vettura.

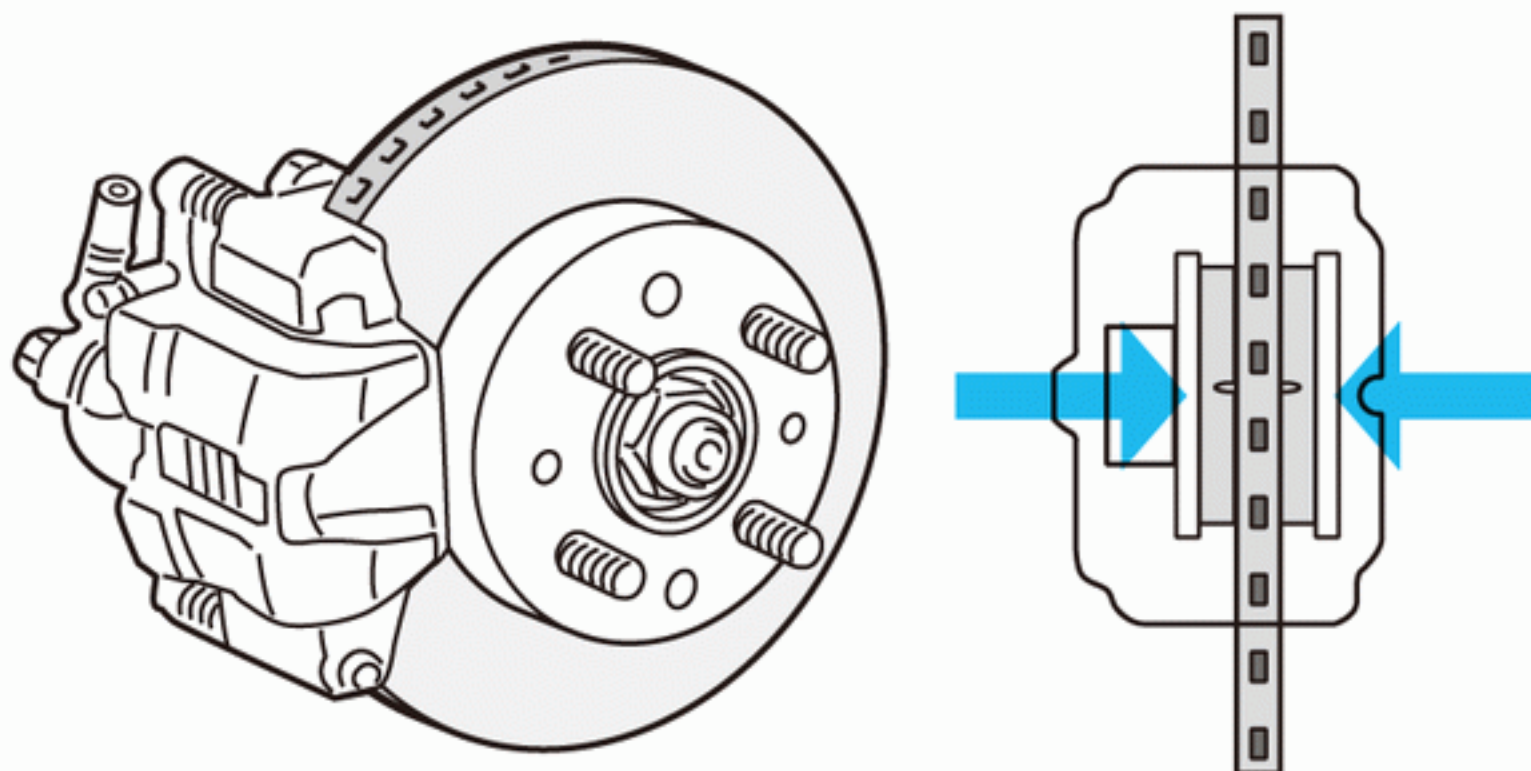
Nel circuito non si usa olio, ma un liquido speciale realizzato appositamente per impianti frenanti. Questo liquido non deve andare in ebollizione a causa del calore generato dei freni: ne esistono diversi tipi, con diverse temperature di ebollizione.

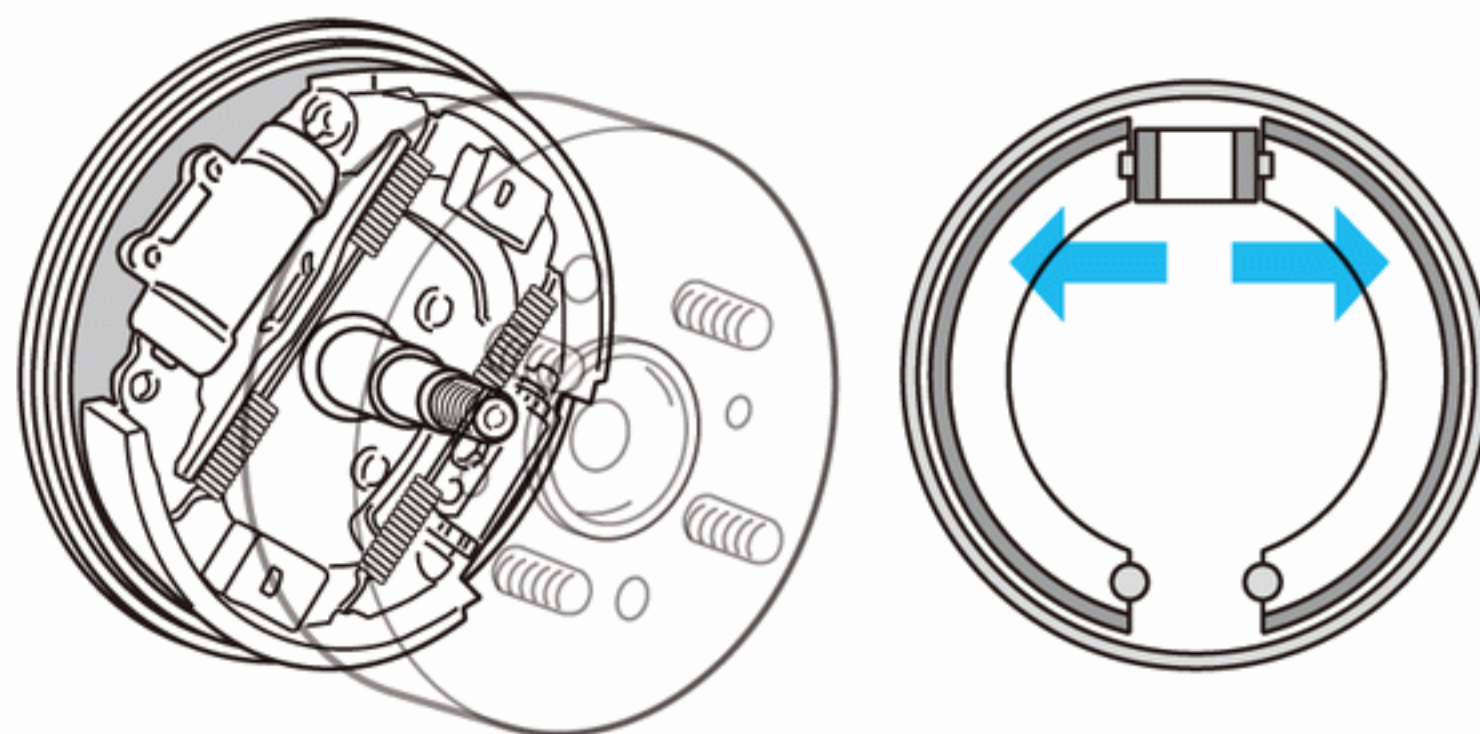
Con la maggiore diffusione delle autostrade, i freni anteriori di molte auto sono passati dai freni a tamburo a quelli a disco, in cui la forza frenante è applicata a entrambi i lati dei dischi da pastiglie azionate da una pinza.

I freni a disco si sono evoluti, con l'introduzione di dischi ventilati con migliore dissipazione del calore. È migliorata anche la tecnologia delle pinze, passata da meccanismi a pistoncini opposti alle pinze flottanti, più grandi e ad alta prestazione.

Pedale del freno
Amplificatore di frenata
Pompa freno
Attuatore ABS
Centralina
Sensore anteriore
Sensore posteriore
Percorso del segnale
Condotto del freno

Come si arresta un'auto?

Freni a disco

Le ruote vengono frenate grazie all'attrito su entrambi i lati di un disco metallico solidale, montato su ciascuna di esse. Il vantaggio è che molti elementi, disco incluso, sono esposti all'aria esterna, consentendo una ventilazione e dispersione termica ottimale, rendendo rari i casi di surriscaldamento. Inoltre, i freni a disco sono in grado di disperdere eventuale acqua sulla superficie con il semplice movimento della ruota e con una scarsa perdita di attrito. La loro frenata è più facilmente modulabile; tuttavia, i dischi non sono in grado di moltiplicare la potenza frenante allo stesso livello di quanto avviene con i freni a tamburo e presentano una minore tenuta durante il parcheggio.

Freni a tamburo

La frenata avviene grazie a un elemento cilindrico rotante, collegato alla ruota, sulla cui superficie interna agiscono le guarnizioni d'attrito fissate alle ganasce. Rispetto al disco si surriscalda molto più rapidamente e, se dell'acqua entra al suo interno, occorre tempo per recuperare efficacia. Tuttavia, in fase di frenata, il tamburo trascina autonomamente le ganasce contro la superficie d'attrito, incrementando così la potenza frenante. Nelle vetture per il trasporto di passeggeri, solitamente questo sistema viene utilizzato sul retrotreno, che richiede una minore forza frenante. Sui veicoli più grandi, spesso i freni tamburo sono montati all'interno di freni a disco, sulle ruote posteriori, in modo da agire come freno di parcheggio.

Problemi di frenata dovuti all'eccesso di calore

Fading

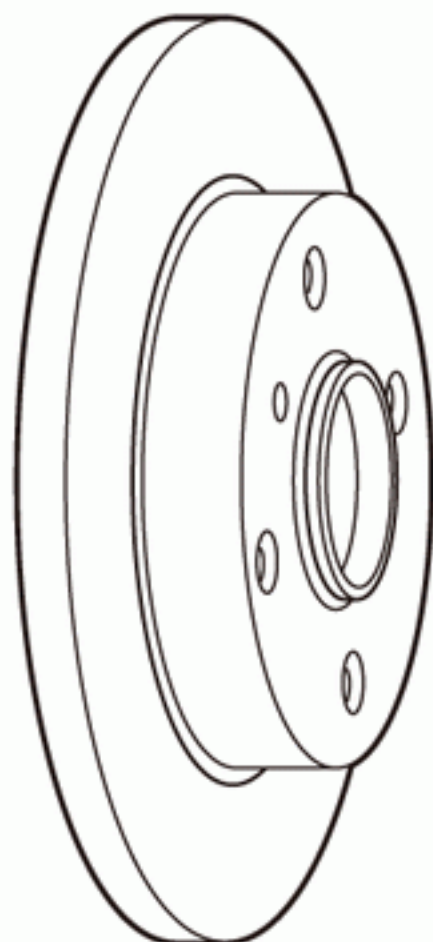
È una progressiva perdita di efficienza dei freni dovuta all'uso intenso. Le pastiglie o superfici di attrito si surriscaldano e rilasciano gas, con formazione di una sorta di pellicola che riduce la frenata.

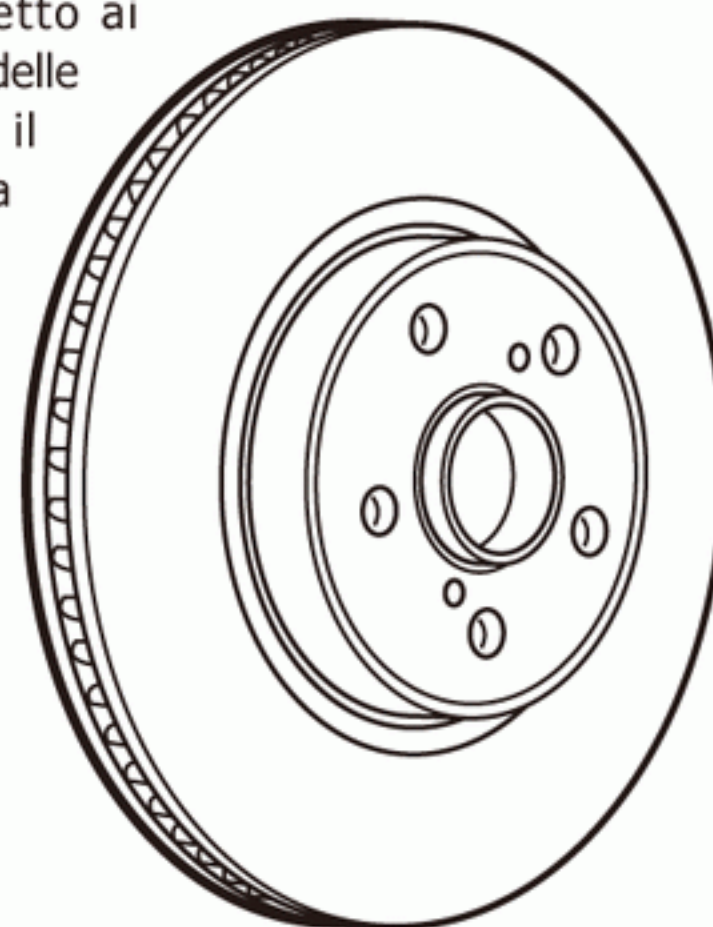
Vapor lock

È una situazione in cui il liquido dei freni assorbe il calore delle pastiglie o delle superfici di attrito ed entra in ebollizione, formando bolle di vapore nel condotto dei freni. Quando il pedale del freno viene premuto, la pressione non viene trasmessa efficacemente dal fluido e, nel peggiore dei casi, la frenata risulta del tutto impossibile.

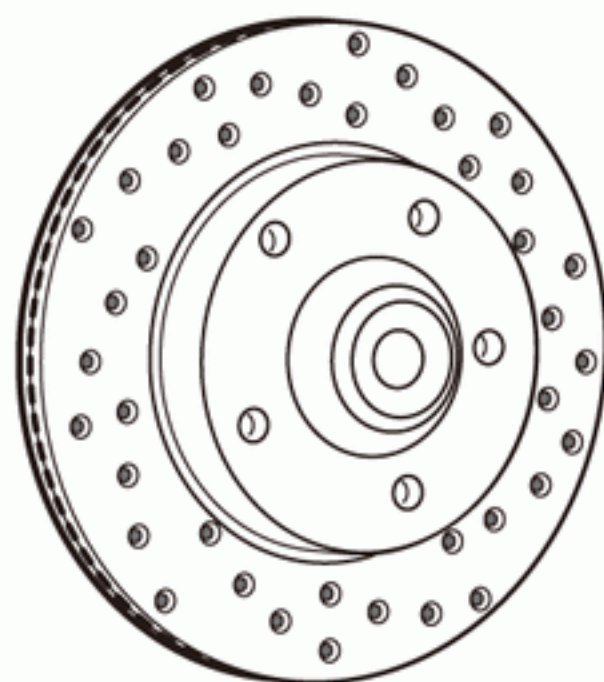
Tipi di dischi dei freni

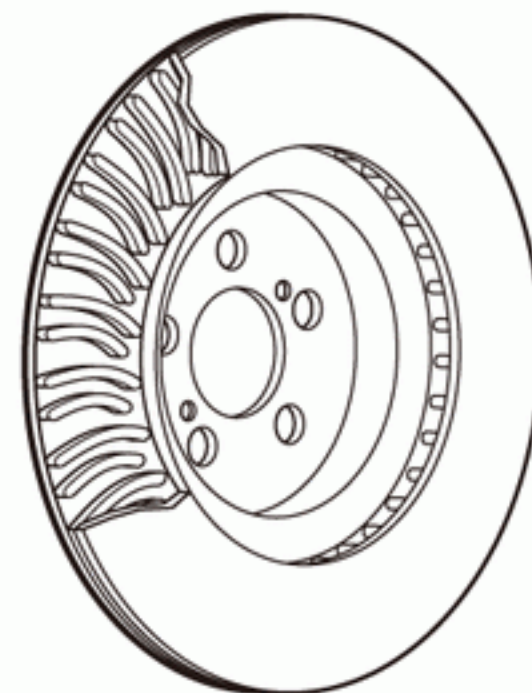
Disco pieno

È il tipo di base, costituito da un semplice disco di metallo. La dispersione termica è inferiore rispetto ai dischi ventilati, ma il minore costo di fabbricazione lo rende una scelta gettonata nei freni anteriori delle auto più leggere e nei freni posteriori delle 4WD, dove il carico della frenata è relativamente ridotto. Molti dischi, inclusi quelli di tipo ventilato, sono spesso realizzati in ghisa, in quanto devono essere resistenti all'attrito ed efficaci nel disperdere calore.

Dischi ventilati

Sono costituiti da due dischi sovrapposti con fori di ventilazione tra loro. Sviluppati inizialmente per le auto da corsa, ora si trovano anche nei modelli di serie. Rispetto ai dischi pieni, la temperatura delle superfici è ridotta di circa il 30%, aumentando la durata delle pastiglie e la resistenza al fading. Tuttavia, lo svantaggio è che il doppio spessore li appesantisce leggermente.

Tipi avanzati di dischi ventilati

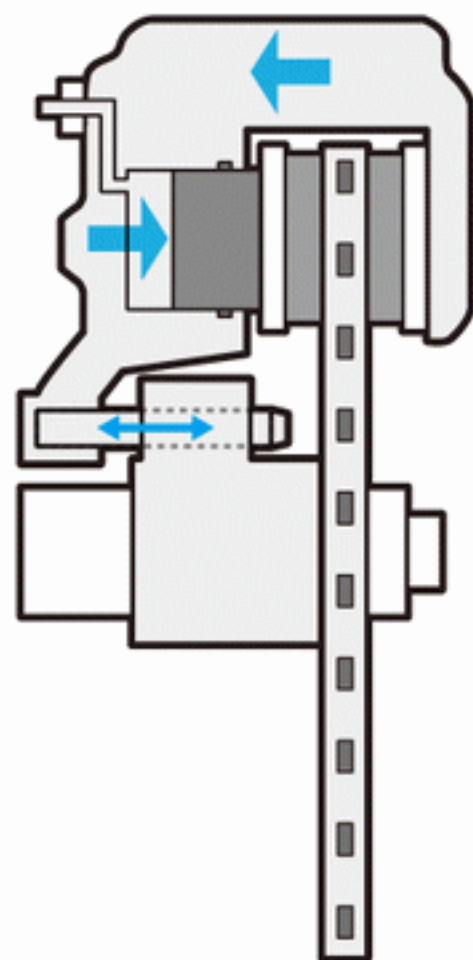
Disco perforato

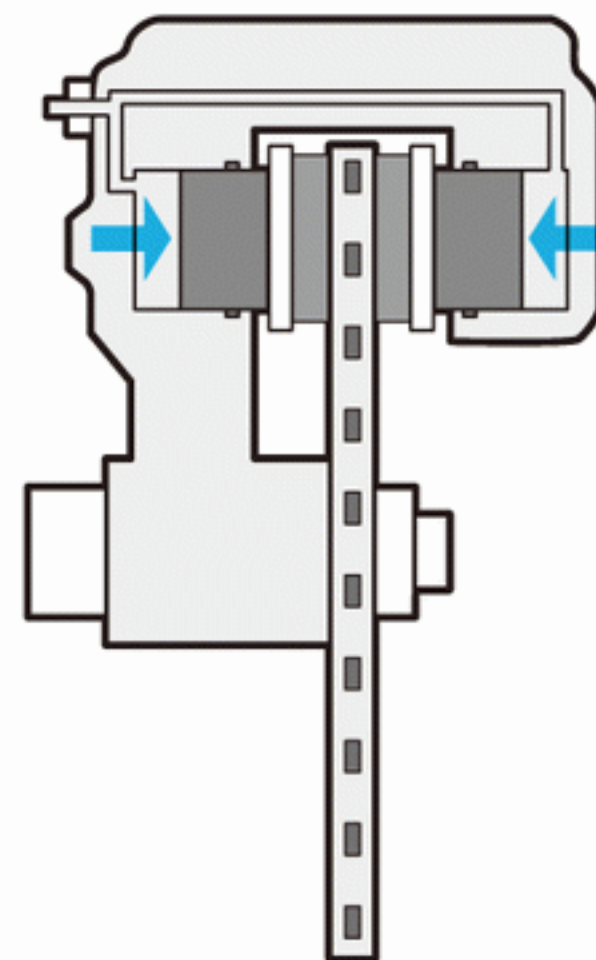
È simile a un disco ventilato, ma con più fori ricavati sulla superficie per aumentare la dispersione termica. Viene utilizzato spesso su auto da gara e sportive di alta fascia. I fori aiutano inoltre a rimuovere il materiale abraso durante la frenata. Altri tipi di dischi, detti "con baffatura", presentano delle scanalature sulla superficie per ottenere il medesimo risultato.

Disco con alette a spirale

Due dischi sovrapposti con alette di dispersione termica disposte a spirale fra di loro. Progettate secondo l'analisi numerica del flusso d'aria nel disco, le alette lo massimizzano e disperdono il calore con estrema efficienza grazie alla rotazione della ruota. Questi dischi vengono utilizzati nelle sportive ad alte prestazioni e nelle berline più pesanti e potenti.

Dischi e pinze

Tipi di pinze

Flottanti

Una pinza flottante ha un pistoncino montato da un lato che preme la pastiglia contro il disco quando viene premuto il freno, mentre la forza di reazione spinge la pastiglia opposta contro l'altro lato. Dato che il contatto delle pastiglie sul disco è costantemente regolato, non ci sono ritardi e la frenata è morbida e regolare. La pinza è piccola e leggera e riesce a esercitare forza frenante anche con un disco deformato dal calore eccessivo. Questo sistema inizia a perdere efficacia in situazioni ad alta intensità, ma non presenta problemi nella normale guida su strada.

A pistoncini opposti

In questa configurazione, i pistoncini sono posti su entrambi i lati del disco, in modo da applicare pressione in modo uniforme. Poiché in questa configurazione le pinze sono più grandi e pesanti, devono essere costruite in alluminio per ridurre il peso, con conseguenti problemi di rigidità qualora non siano ben progettate. Si tratta di un sistema molto efficace nelle gare sportive, ma le pinze devono essere montate su una struttura flottante per sfruttarne il potenziale, in quanto un normale disco potrebbe subire deformazioni per via del calore e compromettere l'efficacia delle pastiglie a causa di un angolo di contatto tutt'altro che ottimale. Ormai anche le auto di serie iniziano a montare freni maggiorati, con pinze con quattro o sei pistoncini che premono pastiglie più grandi. I pistoncini in mostra tra le feritoie dei cerchi in lega sono un chiaro indicatore delle elevate prestazioni dell'auto che li monta.

Ammortizzatori per controllare il movimento del corpo vettura

Compressione ed estensione possono sembrare processi semplici, ma senza un sistema di sospensioni adatto non sarebbe possibile controllare una vettura.

Struttura e principi

Le sospensioni sono un meccanismo interposto tra ruote e corpo vettura per assorbire gli urti ricevuti dalle ruote, sostenendo nel contempo il corpo del veicolo. Data la loro notevole influenza sulla tenuta di strada, sono una parte cruciale della struttura dell'auto.

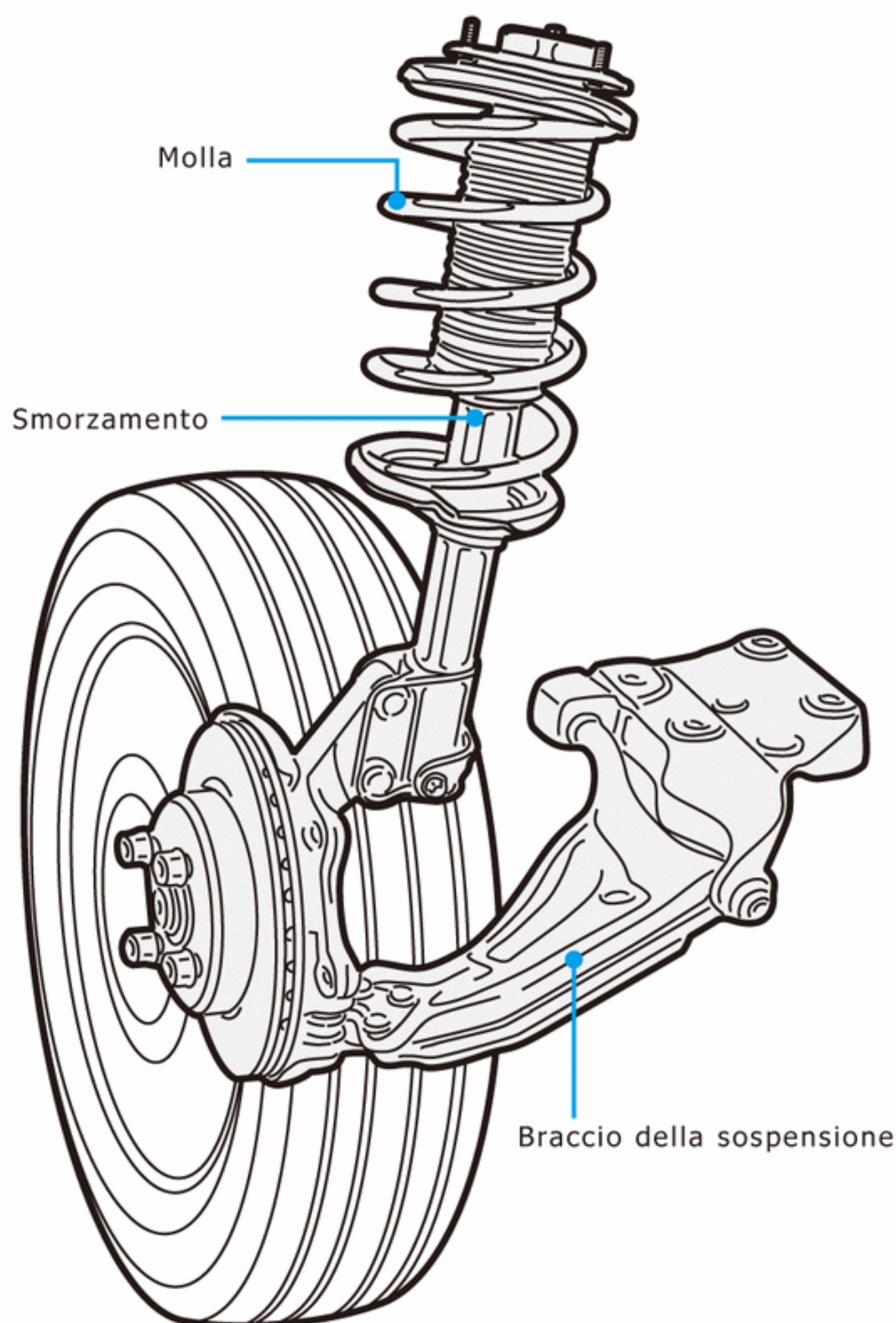
Le sospensioni possono essere interconnesse (il movimento di una ruota influisce su quello dell'altra, sul lato opposto) o indipendenti (le ruote di destra e di sinistra si muovono individualmente, senza influenzarsi a vicenda). Le sospensioni interconnesse comprendono il tipo ad asse, a bracci snodati e a barre di torsione, mentre quelle indipendenti comprendono le sospensioni MacPherson e a doppio triangolo.

Le sospensioni sono costituite da molle, ammortizzatori e agganci. Le molle assorbono l'urto dal fondo stradale, mentre gli ammortizzatori limitano la vibrazione delle molle, offrendo comodità e stabilità, mentre gli agganci controllano il movimento della ruota, mantenendo sempre il contatto ottimale con il fondo stradale. Il sistema delle sospensioni nel suo insieme gioca un ruolo importante nel premere le gomme contro la strada, grazie alle molle, regolando la loro posizione.

L'illustrazione mostra sospensioni di tipo MacPherson. Utilizzate per la prima volta in Giappone, sulla Toyota Corolla, sono divenute molto comuni fra le auto di serie. Il sistema MacPherson unisce un montante telescopico con un braccio superiore a doppio triangolo: questa soluzione riduce il numero di componenti necessari e lascia più spazio al vano motore.

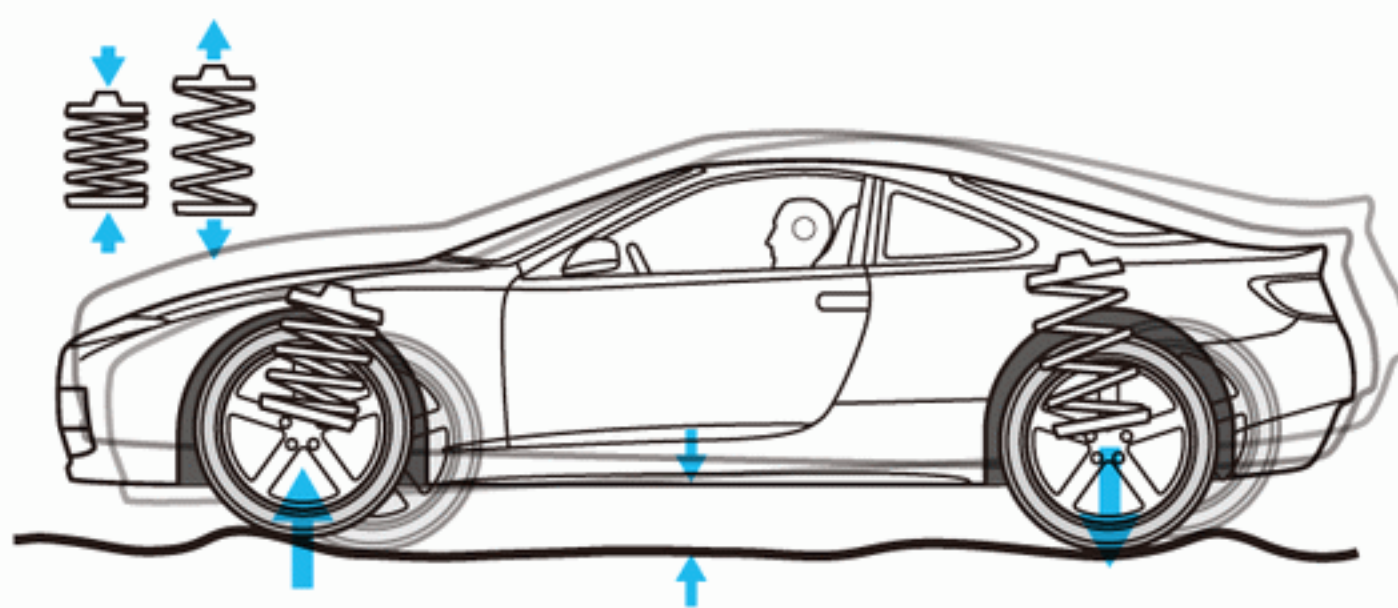
Molla

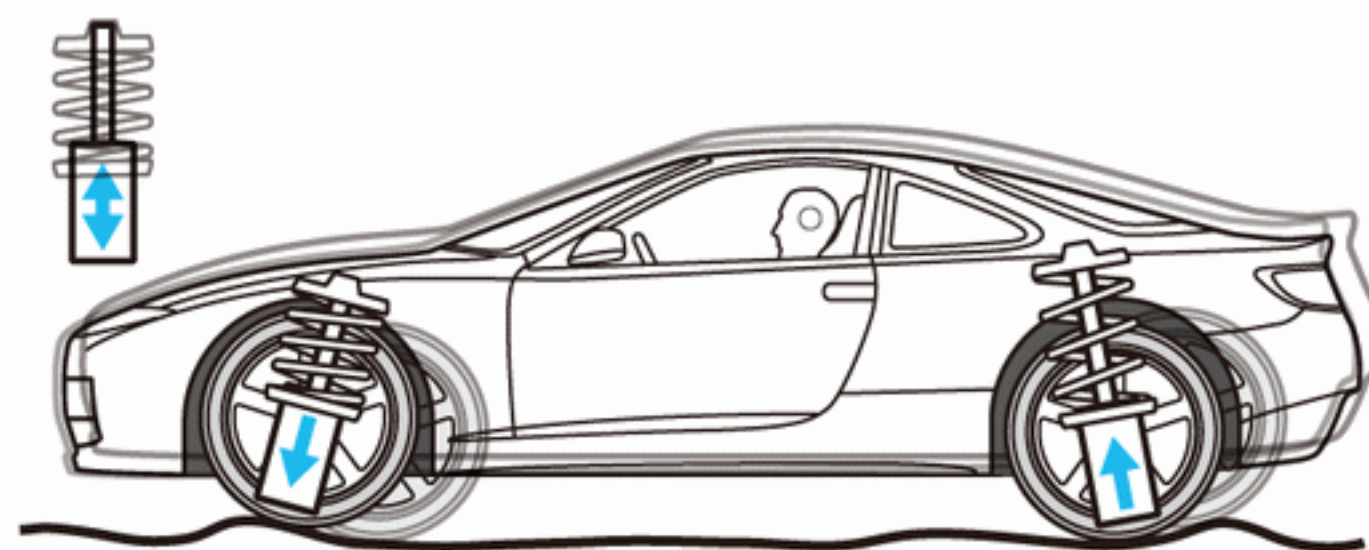
Smorzamento

Braccio della sospensione

Esempio di sospensione MacPherson

Controllo totale durante la marcia, in curva e in frenata

Molle

Le molle assorbono l'impatto subito dall'auto durante la guida: oltre a ridurre l'urto, assicurano che l'auto resti ad altezza costante. Le molle sono un fattore importante per la manovrabilità, ma entrano in gioco anche per quanto riguarda tenuta di strada e stabilità. La sola messa a punto delle molle può avere un effetto notevole sulle prestazioni. Spesso si usano molle metalliche a spirale, ma alcune auto montano sospensioni ad azione pneumatica.

Ammortizzatori

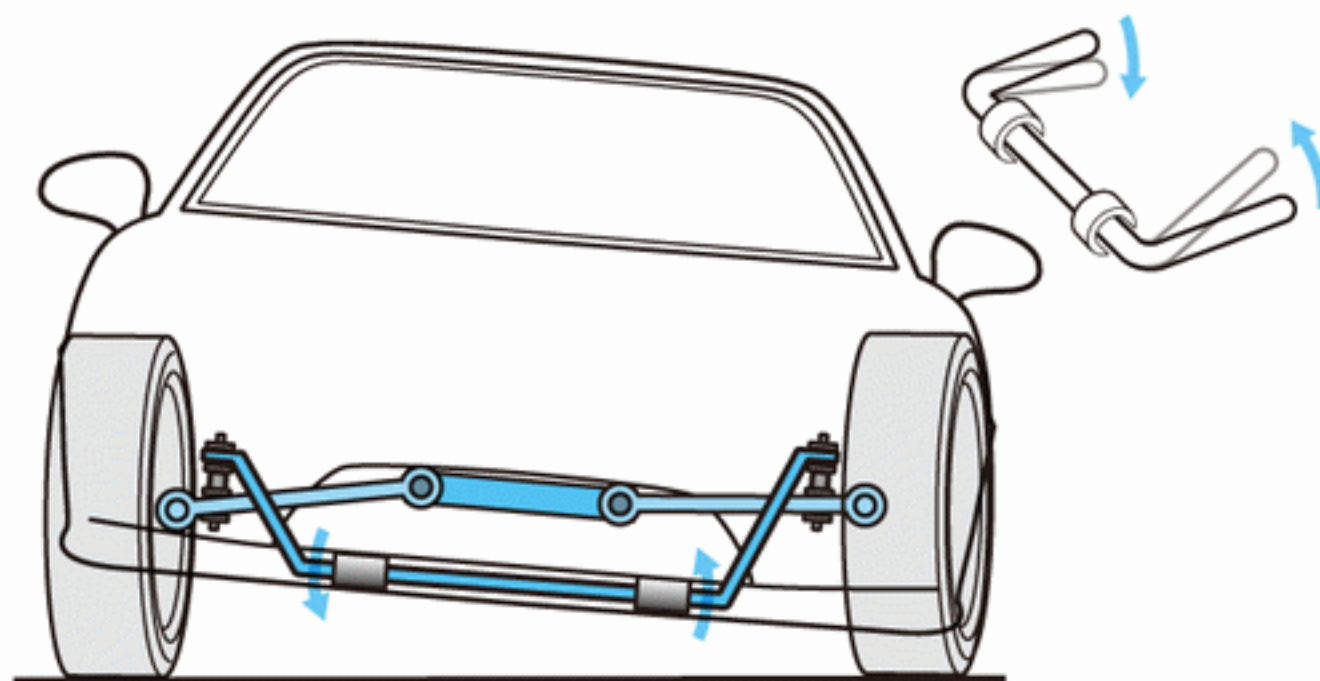
Una molla può assorbire un impatto quando ha un carico che le preme sopra, ma a quel punto continuerebbe a ondeggiare verticalmente se non fosse per gli ammortizzatori, che ne smorzano il movimento. Il tipo più comune usa la resistenza di un pistone immerso in olio e gas, il cui lento movimento oscillante assorbe i movimenti verticali più bruschi della molla. Gli ammortizzatori influiscono su manovrabilità e stabilità allo stesso modo delle molle.

Bracci della sospensione

I bracci della sospensione, fissati a corpo vettura e asse tramite boccole, sono gli elementi deputati al controllo del movimento della ruota. Ve ne sono di diversi tipi, per esempio con bracci ad A o a I. Normalmente sono in acciaio, ma nei modelli sportivi si utilizza anche l'alluminio per ridurre il peso. Una sospensione a doppio triangolo ha due bracci, che vengono identificati come braccio superiore e braccio inferiore.

Boccole della sospensione

Le boccole della sospensione, costruite in materiale ammortizzante, fungono da raccordo tra le parti metalliche della sospensione, come agganci e bracci, o tra altre parti della carrozzeria. Se sono troppo morbide, potrebbero deformarsi quando il carico cambia rapidamente, per esempio in curva, provocando un cattivo movimento delle sospensioni e una conseguente riduzione di manovrabilità e stabilità. In genere, le boccole sono costruite in gomma, un materiale perfetto per assorbire gli urti, ma nelle vetture da gara si usa spesso un cuscinetto metallico a snodo sferico, in modo da ottenere la massima precisione. Le boccole delle sospensioni sono un componente molto importante per le prestazioni di molle e ammortizzatori.

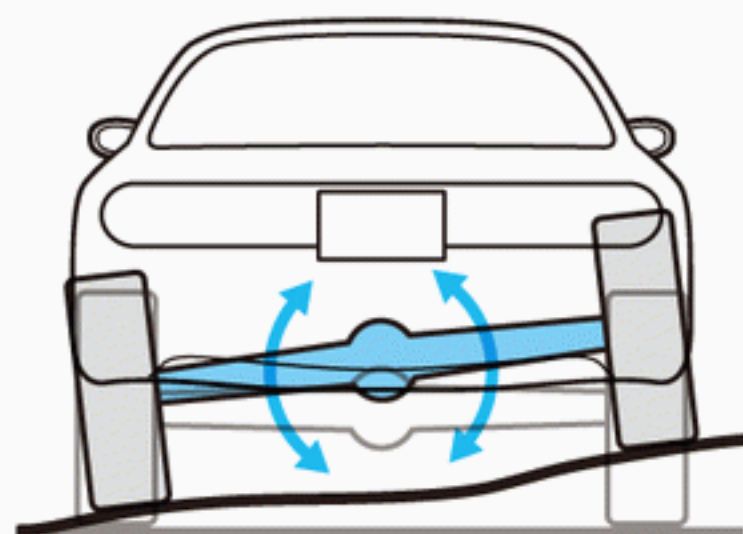
Barra stabilizzatrice

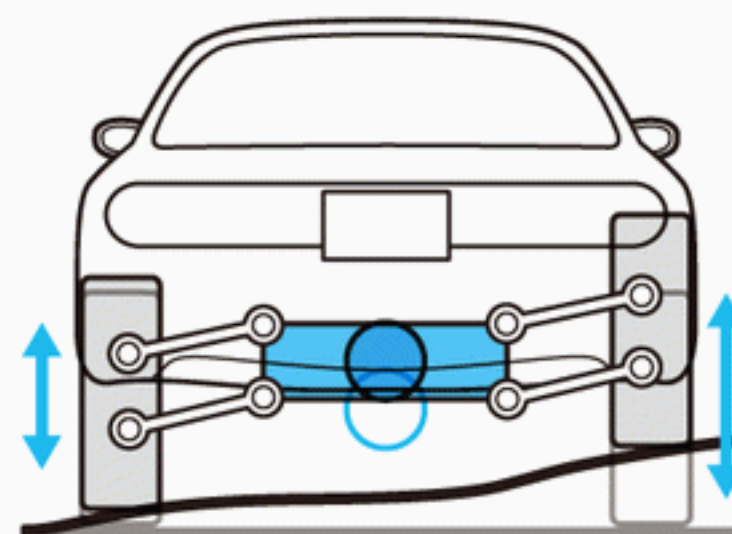
La barra stabilizzatrice è un dispositivo di stabilizzazione che limita il rollio della vettura mediante una molla su una barra di torsione. Può anche essere definita barra antirollio. È collegata a entrambe le estremità dei bracci inferiori delle sospensioni e reagisce solo agli spostamenti asimmetrici delle sospensioni destre e sinistre. Per esempio, in curva, il lato esterno della vettura si abbassa, mentre il lato interno si solleva. La barra stabilizzatrice bilancia il movimento, in modo che il rollio dell'auto non risulti eccessivo, migliorando la stabilità. Questo effetto può essere utilizzato per contrastare l'insorgenza di sovrasterzo e sottosterzo.

Tipi di sospensioni

Anche se le sospensioni svolgono tutte gli stessi compiti di base, vale a dire mantenere l'altezza del veicolo e assorbire gli urti e i cambiamenti di carico generati dalla guida, ne esistono diversi tipi. Ciascun modello di sospensioni influenza diversamente elementi della guida quali la sterzata, la manovrabilità (e di conseguenza la sicurezza) e il comfort generale.

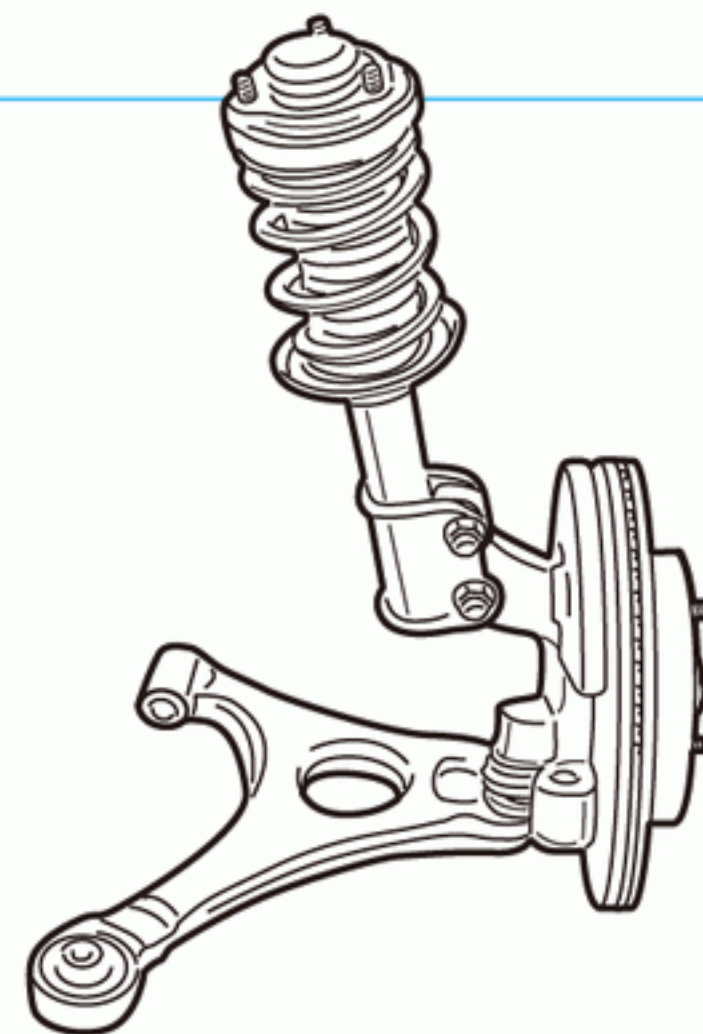
Le sospensioni vengono migliorate di continuo e spesso vengono presentati nuovi modelli. Un sistema eccessivamente complicato, però, non risulta necessariamente migliore, ma l'esigenza di gestire sconnessioni e irregolarità del terreno mantenendo le ruote sempre a contatto con la strada ha però portato all'introduzione di soluzioni sempre più raffinate.

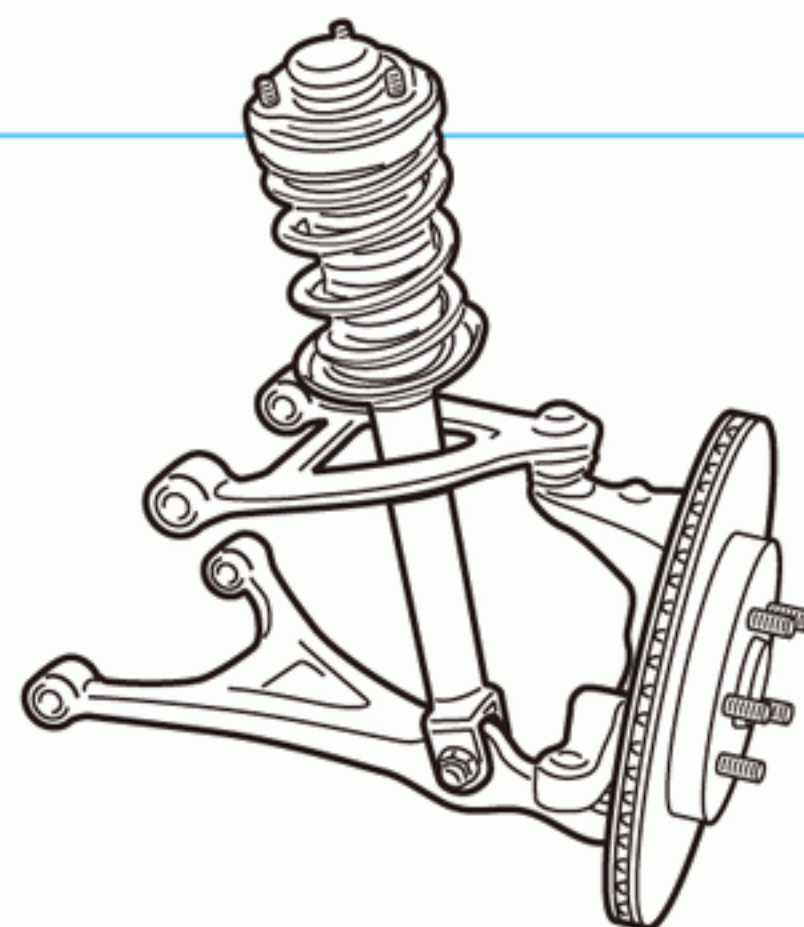
Assale rigido

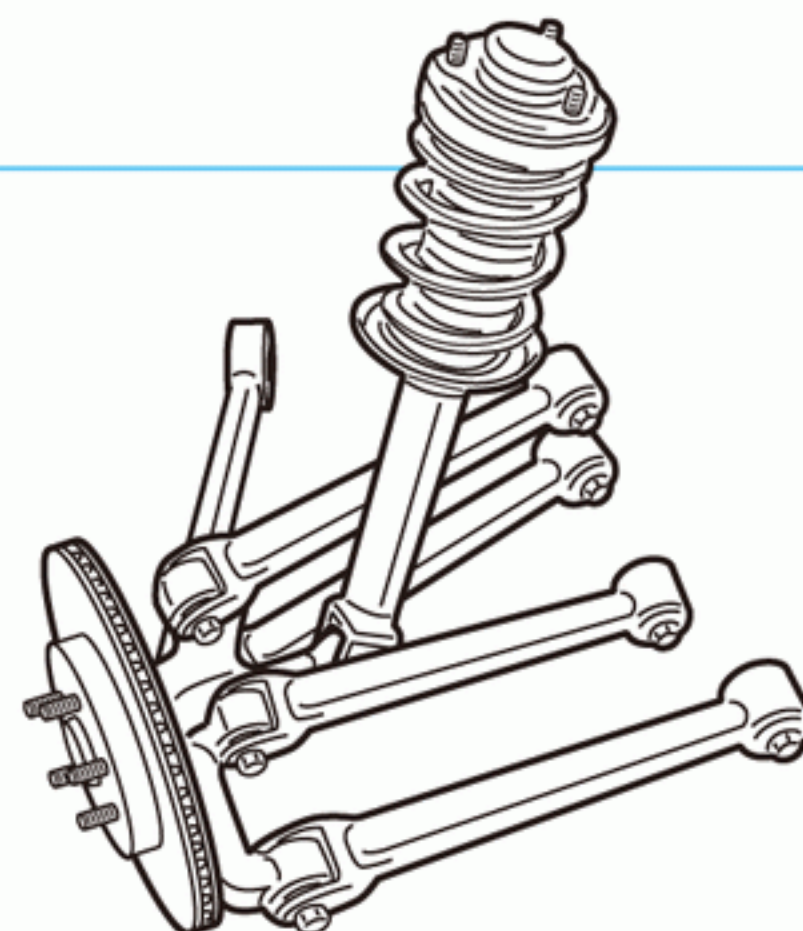
Nelle sospensioni ad assale rigido, la ruota destra e quella sinistra sono fissate a un unico asse e i movimenti su un lato si ripercuotono anche sull'altro. Per questo motivo, l'auto può perdere più facilmente aderenza. Inoltre, questa configurazione comporta un aumento delle masse sospese. Data la sua solidità e i bassi costi di produzione, si utilizza ancora nelle sospensioni del retrotreno di auto a trazione posteriore di fascia bassa.

Sospensioni indipendenti

Sono ideali per affrontare sconnessioni e irregolarità della strada, perché consentono alla ruota destra e quella sinistra di alzarsi e abbassarsi in modo indipendente. Nel caso delle auto a trazione posteriore, ciò contribuisce a distribuire in modo efficace la potenza su entrambe le ruote. Un sistema leggero e stabile, che offre una guida piacevole.

Sospensioni indipendenti, la soluzione preferita per le sportive

Sospensioni MacPherson

Una sospensione concettualmente semplice, composta da una molla, un ammortizzatore e un braccio di controllo inferiore. L'ammortizzatore svolge anche il ruolo di supporto, in questo tipo di sospensione. La parte superiore sostiene il corpo vettura tramite un supporto in gomma, mentre la parte inferiore dell'ammortizzatore è sostenuta dal braccio inferiore. I pochi componenti la rendono leggera e la corsa è più che buona, cosa che permette di assorbire un'ampia gamma di vibrazioni. Il sistema è stato progettato da Earle S. MacPherson, da cui ha preso il nome.

Sospensione a doppio triangolo

Una soluzione che sostiene le ruote con bracci inferiori e superiori collegati fra loro. Questi bracci sono solitamente disposti a V e ricordano l'osso a forchetta degli uccelli. A seconda della sagoma dei bracci e del tipo di vettura, il sistema può controllare in modo relativamente facile le modifiche nell'allineamento e nel posizionamento dell'auto in fase di accelerazione. La sospensione è inoltre molto rigida, cosa che la rende adatta alle sportive per le caratteristiche di controllo e stabilità. Rimane comunque un sistema complicato, con molti componenti e che occupa molto spazio.

Multilink

Si tratta di una versione avanzata del sistema a doppio triangolo, che utilizza da tre a cinque bracci per mantenere la posizione dell'asse. I bracci sono tutti separati, cosa che garantisce la massima libertà nel posizionamento e permette di procedere a regolazioni estremamente mirate. Il maggior numero di bracci consente di gestire il movimento in molte direzioni e mantiene sempre le ruote a stretto contatto con la superficie stradale. Questo tipo di sospensione viene spesso utilizzato sul retrotreno di vetture FF a prestazioni elevate, per mantenere la stabilità ad alta velocità, oppure sulle auto a trazione posteriore di grande potenza, per garantire la trazione.

Le caratteristiche dei diversi tipi di sospensioni

Assetto delle ruote

Osserva un mobile con delle ruote nella parte inferiore: se lo guardi direttamente dall'alto, dovresti notare che l'asse della ruota presenta un leggero angolo, in relazione all'asse che lo collega al mobile. Questo leggero disallineamento è quello che fa sì che la ruota si muova in linea retta quando viene spinta, invece di procedere in modo traballante.

Ora immagina uno pneumatico che rotola a terra. Se lo posizioniamo in piedi sul terreno e lo spingiamo, questo avanzerà in linea retta, ma se lo inclianiamo anche leggermente, rotolerà nella direzione dell'inclinazione.

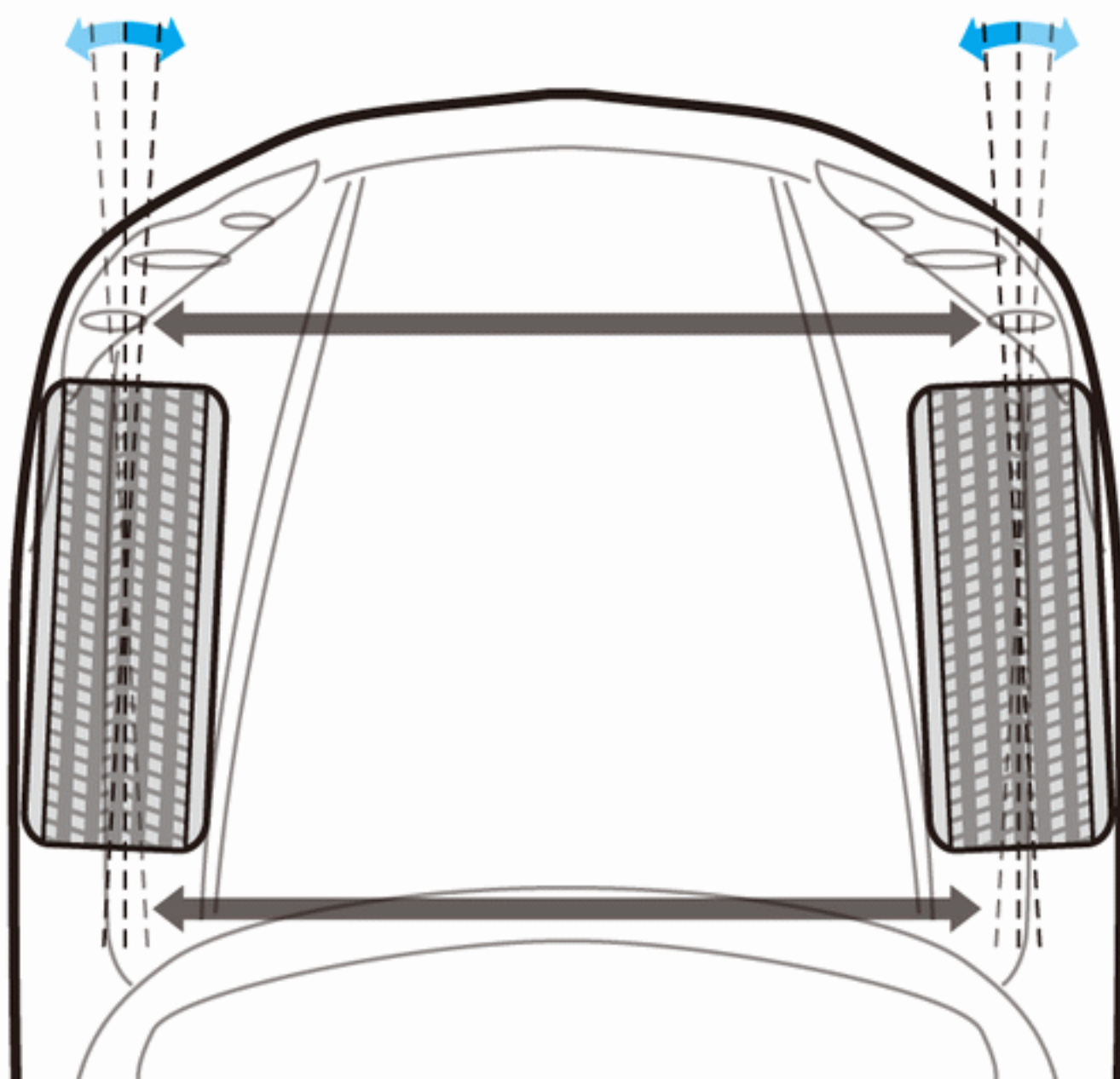
Da ciò si deduce che l'angolo di montaggio delle ruote ne influenza il rotolamento: se vengono impostate sul giusto angolo, sarà possibile per loro muoversi nel modo più adatto per la vettura. Questa è la base del concetto di allineamento delle ruote (o geometria delle sospensioni).

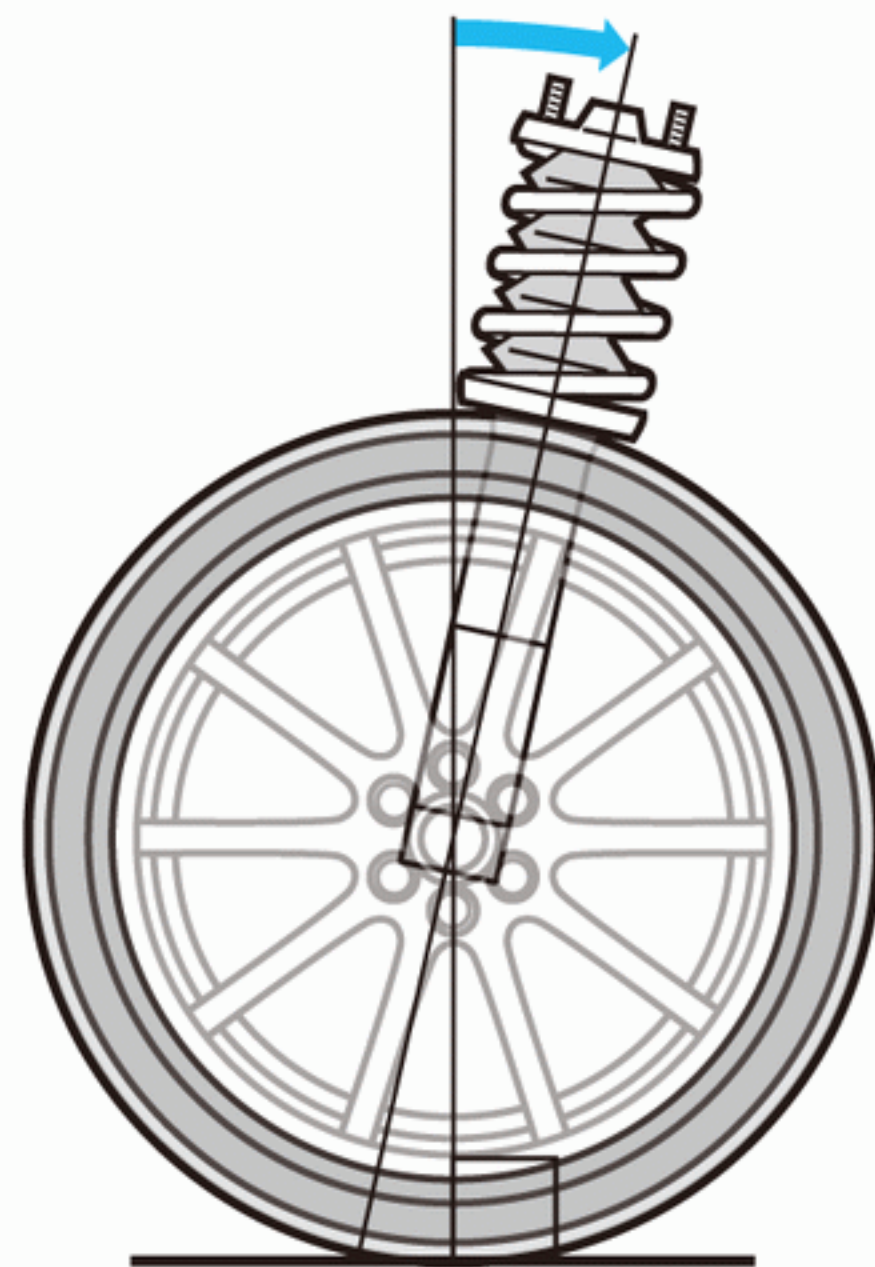
Il corretto assetto delle ruote influenza guida, sterzata e arresto del veicolo. Questo "posizionamento" delle ruote consente di ottimizzarne le prestazioni e ha un'influenza diretta sulle caratteristiche della vettura.

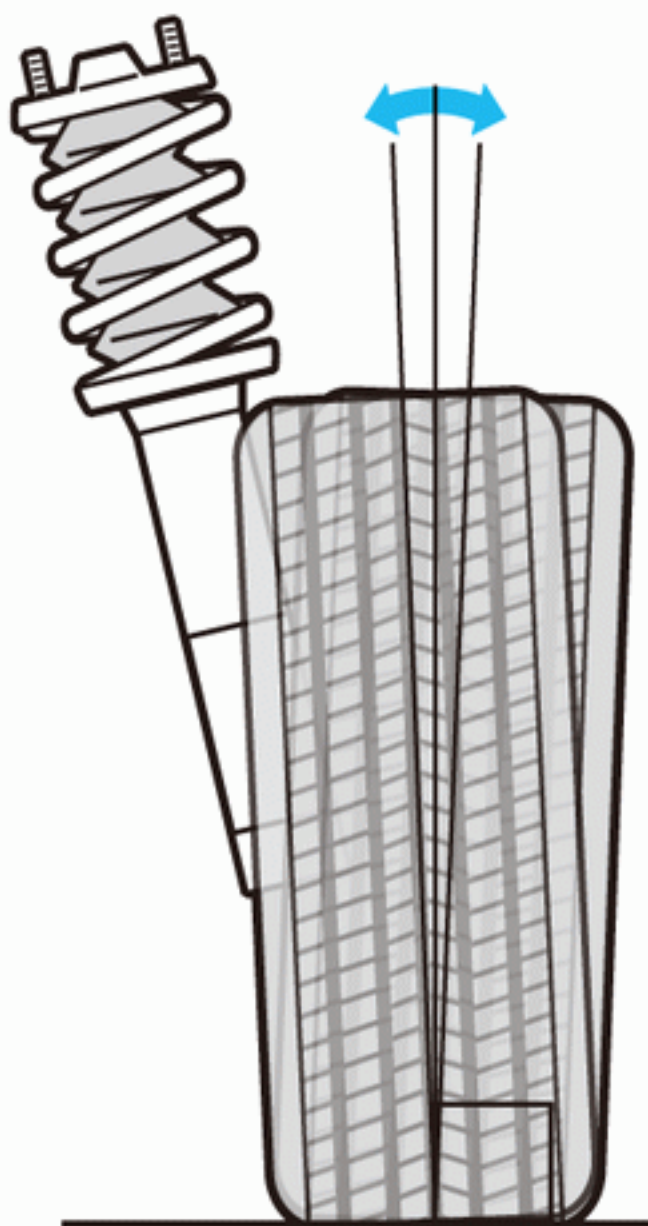
Nella pagina accanto sono illustrati i quattro principali assetti delle ruote: convergenza e divergenza (vale a dire angolazione, quando vengono viste dall'alto), incidenza e angolo delle sospensioni (punto di vista laterale), angolo di campanatura (punto di vista frontale) e inclinazione (l'angolo delle sospensioni in rapporto alle ruote, viste dal davanti). Queste impostazioni vengono regolate con incrementi minimi di 0,1 gradi/0,1 mm, perché basta un piccolissimo errore per impedire all'auto di procedere in linea retta o compromettere la tenuta di strada. Cerca di ricordare sempre i diversi effetti che dipendono da queste impostazioni.

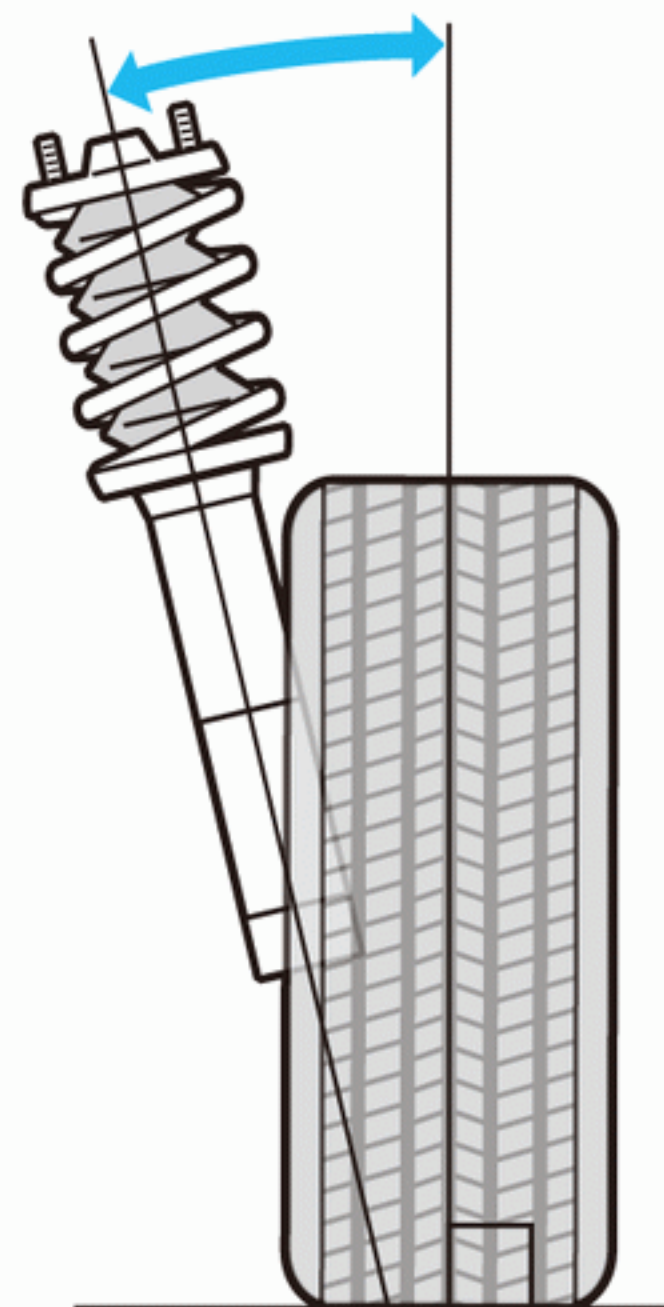
Effetti dell'inclinazione della ruota sull'aderenza al terreno e la tenuta di strada

Convergenza

Guardando dall'alto, questo elemento rappresenta l'inclinazione delle ruote rispetto all'auto. Si parla di "divergenza" quando la parte anteriore delle ruote è inclinata verso l'esterno e di "convergenza " nel caso opposto. Questo angolo ha un grande impatto sul movimento in avanti dell'auto e, se è eccessivo, causa il logorio non omogeneo degli pneumatici.

Incidenza

Guardando lateralmente, è l'angolo delle ruote rispetto alla sospensione anteriore. Questo valore influenza l'oscillazione laterale delle ruote e la tendenza che avranno le ruote ad auto-allinearsi quando si sterza (vale a dire la forza che tende a raddrizzare le ruote mentre si ruota il volante). Se l'incidenza della ruota destra è diversa da quella sinistra, l'auto tende a spostarsi verso il lato con angolo inferiore, oppure manifesta la tendenza a "tirare" su un lato in fase di frenata.

Campanatura

Guardando frontalmente, è l'angolo delle ruote rispetto alla strada. Il valore è "negativo" quando la parte superiore delle ruote è inclinata verso l'interno e positivo quando è inclinata verso l'esterno. In genere si imposta un valore leggermente positivo per contrastare l'effetto dei carichi elevati sulla vettura.

Inclinazione

È l'angolo fra la ruota e il perno di connessione all'asse. In genere viene regolato in modo da impedire una possibile perdita di controllo del veicolo causata dall'irregolarità del fondo stradale, ma può anche influenzare il movimento rettilineo, la tendenza all'auto-allineamento in curva e la forza di sterzata.

Legame fra auto e strada

Il livello di prestazioni di un'auto, per quanto elevato possa essere, dipende sempre dagli pneumatici, in quanto la potenza del motore, veicolata dalle trasmissioni e dalle sospensioni, giunge infine a contatto con la strada attraverso le ruote.

Pneumatici ad alte prestazioni

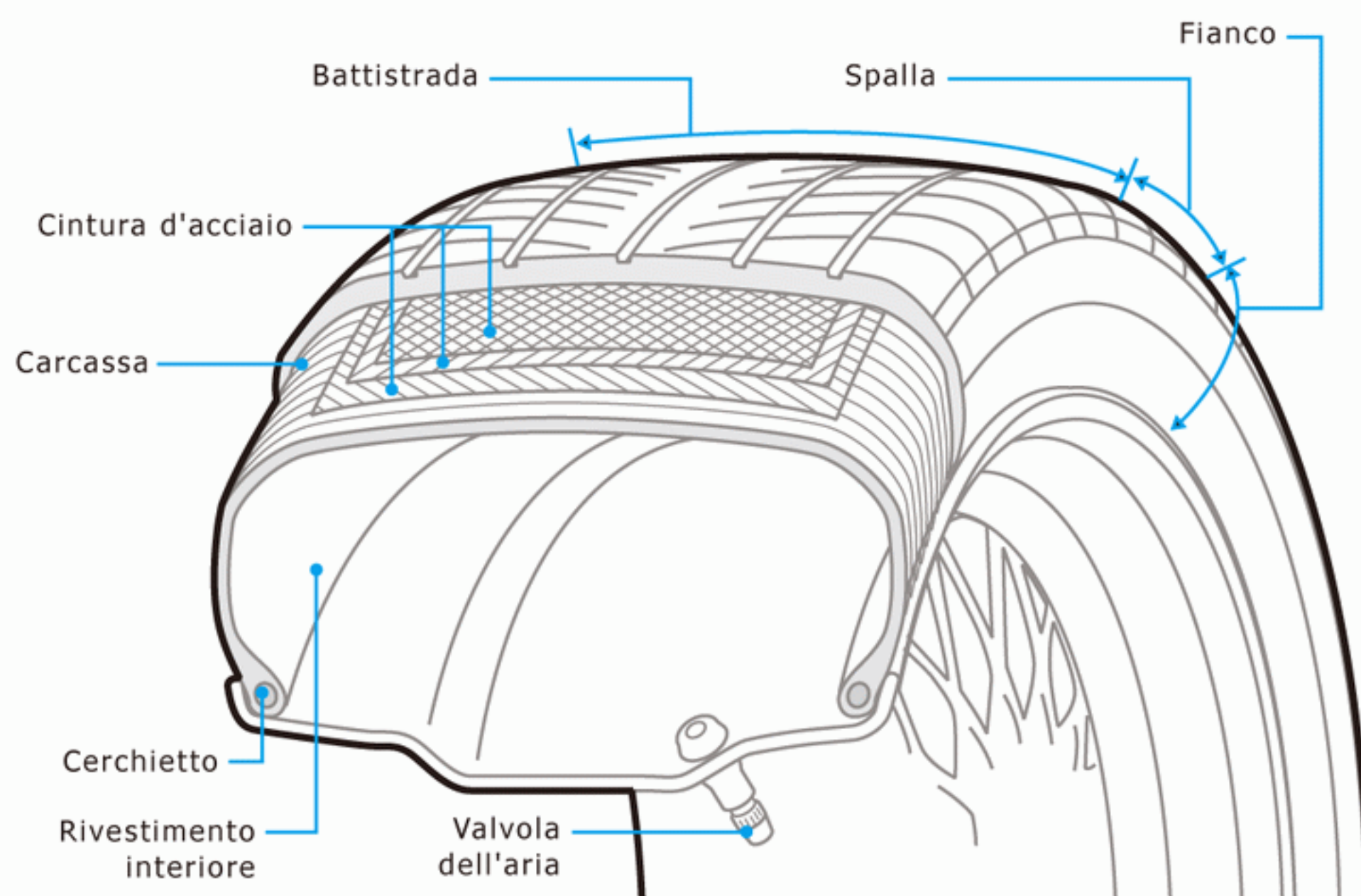
Gli pneumatici hanno quattro caratteristiche fondamentali: supporto del carico, assorbimento degli urti, accelerazione e frenata e mantenimento di una traiettoria stabile durante la guida rettilinea e in curva. Un corretto bilanciamento di questi fattori permette di adattare gli pneumatici alle diverse circostanze.

Nelle auto sportive i fattori più importanti sono accelerazione, decelerazione e mantenimento della traiettoria, per garantire alte prestazioni di guida, sterzata e frenata. Gli pneumatici devono essere di gomma ad alta aderenza, per una presa ottimale sull'asfalto, e rigidi, per conservare la propria forma sotto carichi elevati e affrontare le curve a velocità maggiore e con una migliore risposta.

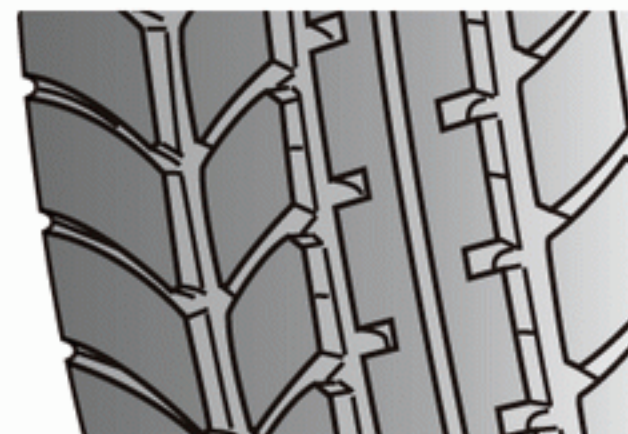
Ovviamente, gli pneumatici ad alta aderenza presentano anche degli aspetti negativi: possono essere spinti al limite nelle curve, ma recuperare l'assetto, quando si supera il limite massimo, richiede grande abilità di guida. Sospensioni e corpo vettura saranno sottoposti a maggiori sollecitazioni, mentre aumenterà il rollio in curva per via proprio dell'elevata aderenza. Questi pneumatici incidono fortemente sull'assetto dell'auto e vanno scelti attentamente in base alla sua potenza. Tieni inoltre presente che, a causa dell'elevato livello di attrito fra le gomme e la superficie stradale, questi pneumatici si usurano rapidamente, diminuiscono il comfort generale nella guida e hanno un livello di rumorosità più elevato.

Sul bagnato, l'aderenza dipende soprattutto dal motivo delle scanalature dello pneumatico. Queste scanalature sono progettate per smaltire efficacemente l'acqua raccolta dalla superficie stradale, ma riducono la rigidità, quindi non è facile raggiungere il giusto equilibrio, specialmente con gomme di tipo sportivo.

Le prestazioni di un'auto sono limitate dal tipo di pneumatici, per cui è molto importante comprendere le loro caratteristiche e prestazioni, in modo da selezionare quelli più adatti per ogni situazione.

Fianco
Battistrada
Spalla
Cintura d'acciaio
Carcassa
Cerchietto
Rivestimento interiore
Valvola dell'aria

Aderenza e rigidità: il segreto della velocità

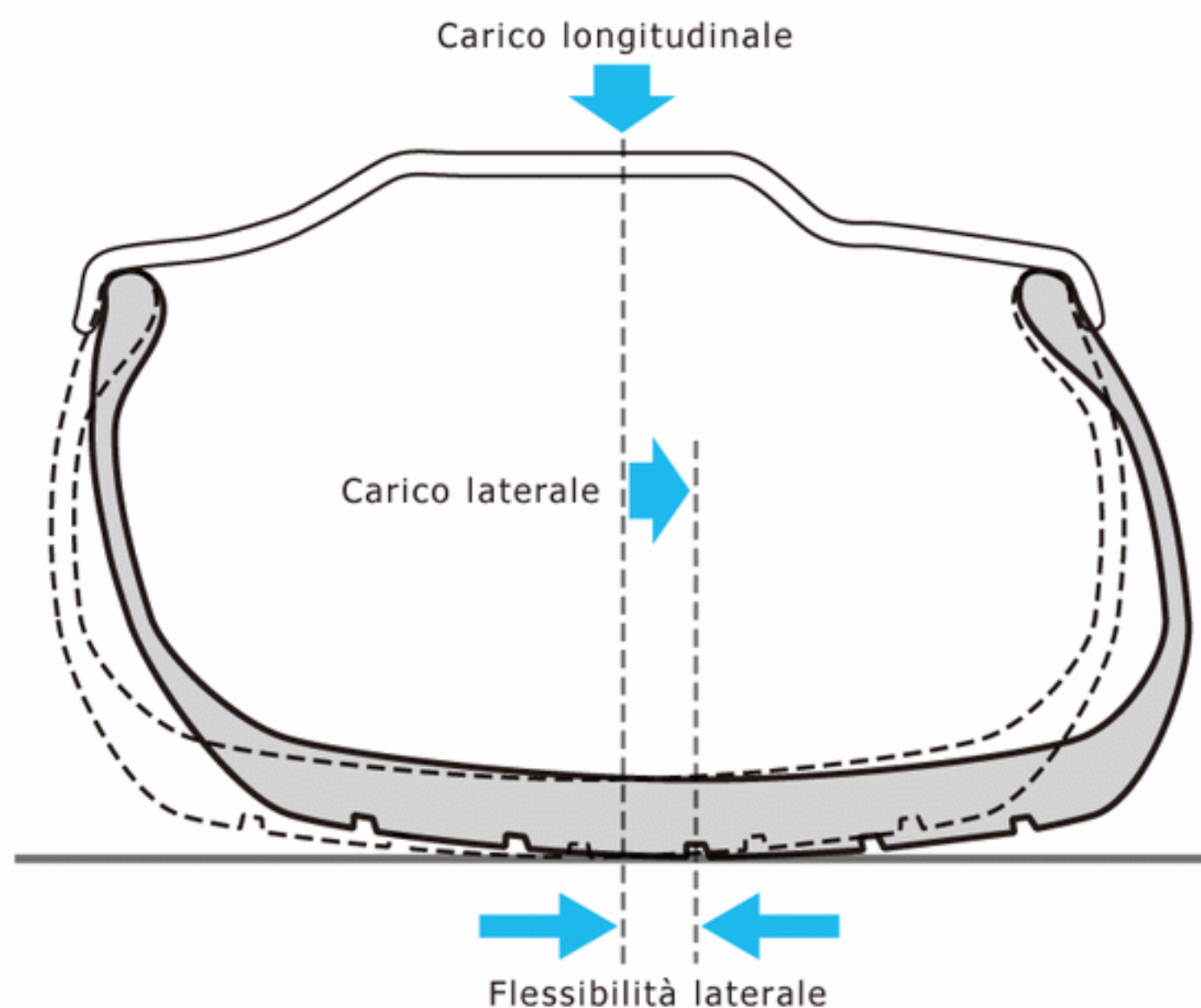
Mescola del battistrada

La mescola della gomma sulla superficie dello pneumatico determina l'aderenza al fondo stradale. Nelle auto da corsa è morbida, per assicurare un'alta aderenza, con lo svantaggio di un logorio più rapido. Nelle auto di serie è più dura, per consentire una maggiore durata, ma non offre un livello di aderenza particolarmente elevato. Gli pneumatici sono normalmente duri e non esprimono la massima aderenza finché non raggiungono la temperatura ottimale: superandola, però, si avrà un'aderenza ridotta.

Disegno del battistrada

Le scanalature sulla superficie dello pneumatico a contatto con il fondo stradale. La loro funzione principale è smaltire l'acqua tramite il rotolamento, quando si guida sul bagnato. Molti pneumatici hanno un senso di rotazione predeterminato per massimizzare la loro efficacia. Tuttavia, dato che queste incisioni riducono la rigidità, gli pneumatici ad alte prestazioni hanno disegni con poche scanalature di grandi dimensioni, piuttosto che complessi intrecci di dimensioni limitate. Esistono anche disegni asimmetrici, con scanalature più rade verso l'esterno, per una maggiore efficienza in curva, e più numerose verso l'interno, per un efficace smaltimento dell'acqua.

Rigidità della carcassa

Con il termine "carcassa" si intende l'intera superficie dello pneumatico, comprendente battistrada, fianco, eccetera. Poiché l'impatto del fondo stradale sul battistrada viene trasmesso a tutti questi componenti, la sua rigidità è importante per evitare problemi in tutte le situazioni in cui aumenta il carico, come accelerazione, decelerazione, sterzata, momenti in cui solitamente si verifica questo evento. Tuttavia, se l'elevata rigidità aumenta le prestazioni, riduce anche il comfort dei passeggeri, perciò è importante bilanciare le varie caratteristiche a seconda dell'uso.

Ruote

Cerchi in alluminio

1 kg in meno in massa sospesa equivale a 15 kg in meno in massa non sospesa. I cerchi leggeri permettono di ottenere prestazioni ottimali in accelerazione, decelerazione e sterzata.

Massa sospesa

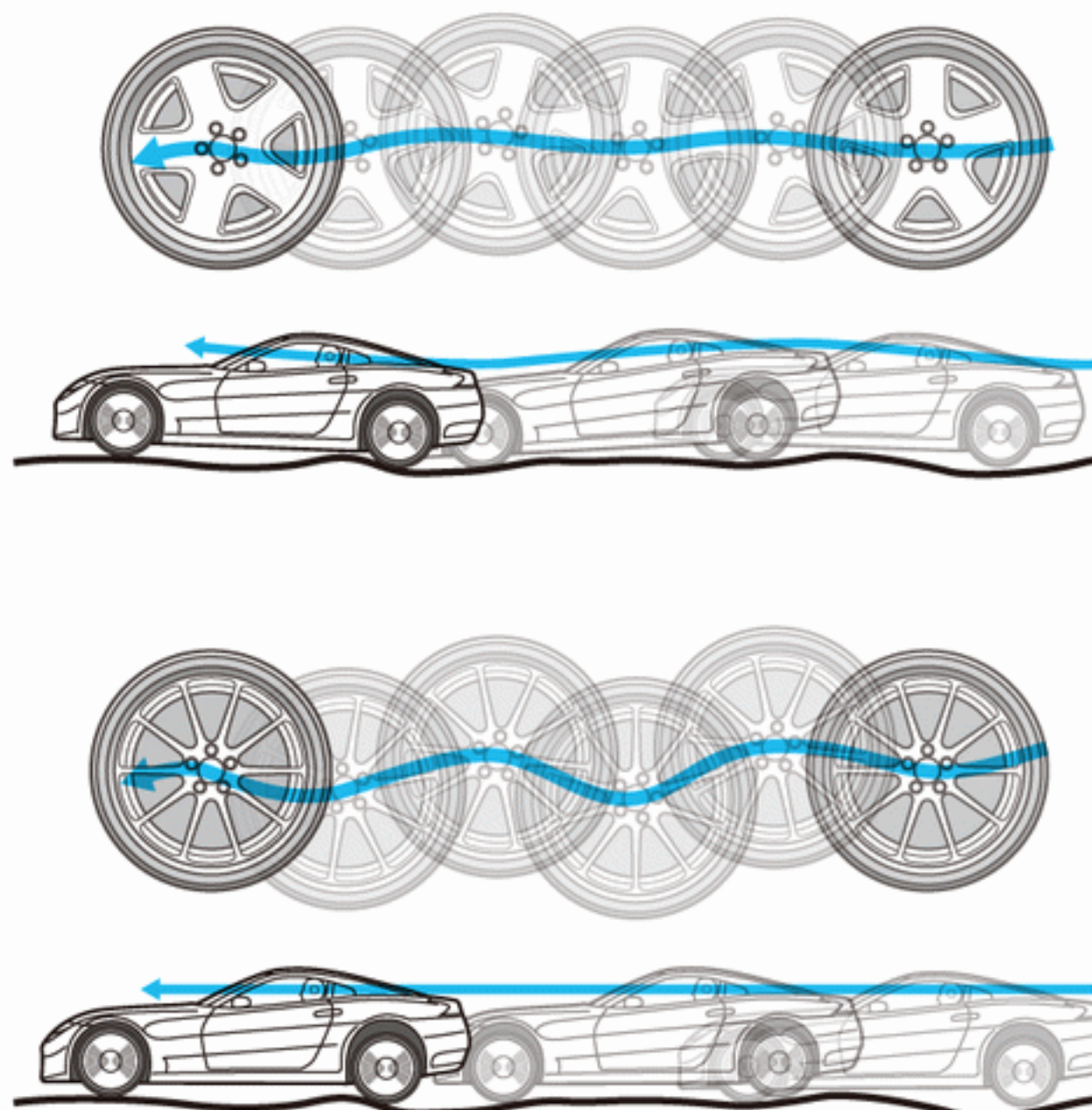
Sebbene i cerchi in alluminio siano spesso considerati solo come un elemento decorativo, permettono di aumentare notevolmente le prestazioni durante la guida.

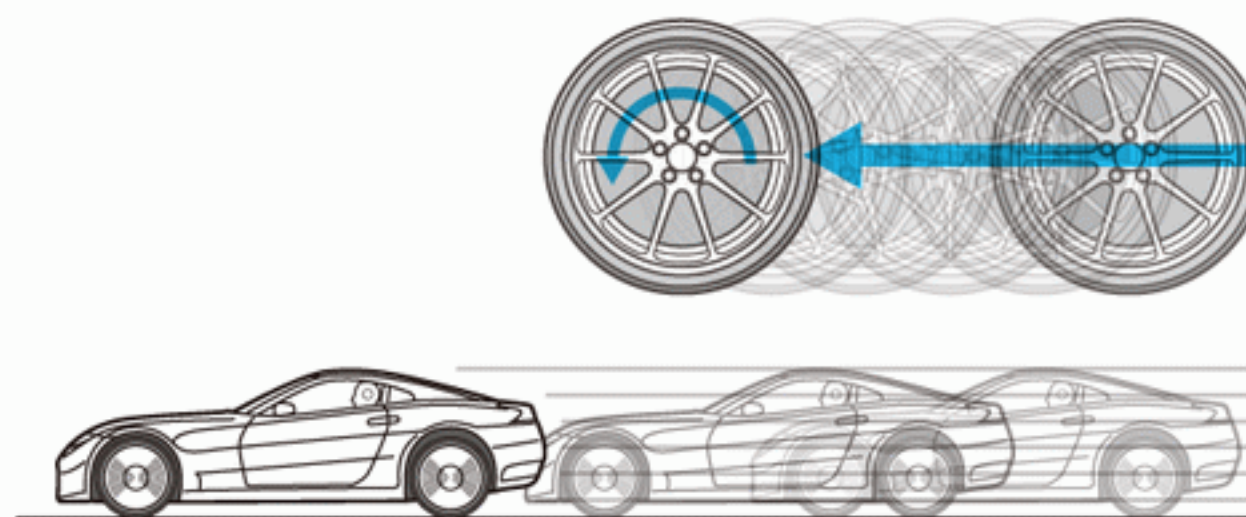
Un'auto richiede la massima potenza nella fase di partenza da ferma. Per far muovere le ruote da una posizione statica è necessaria un'energia notevole, che aumenta con il crescere del peso delle ruote stesse. Per questo, in fase di partenza, i cerchi più leggeri sono un vantaggio.

Le cosiddette "masse non sospese", cioè il peso non supportato dalle sospensioni, influenzano notevolmente le prestazioni di guida. Cerchi e pneumatici leggeri migliorano accelerazione, partenza e frenata, poiché è più facile arrestare la rotazione delle ruote. Anche il funzionamento delle sospensioni sarà più morbido, migliorando comfort dei passeggeri, fluidità della guida ed efficienza nei consumi.

Le ottime prestazioni e la leggerezza (1 kg in meno in una massa sospesa equivale a 15 kg in meno in una massa non sospesa) rendono i cerchi di alluminio molto usati nelle auto sportive. Nel mondo delle competizioni, il peso delle masse sospese può essere ridotto ulteriormente usando cerchi in lega di magnesio, ancora più leggeri di quelli in alluminio.

I cerchi di alluminio comunemente usati hanno anche il vantaggio di essere buoni conduttori di calore e di scaricare efficacemente il surriscaldamento generato dai freni. Inoltre, l'alluminio ha una maggiore resistenza alla corrosione rispetto all'acciaio.

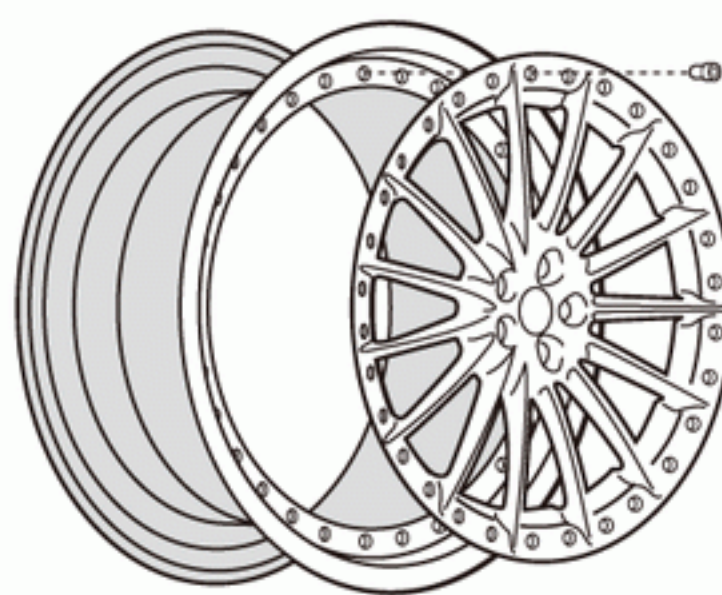
Quando si installano nuovi cerchi, però, è importante considerare le dimensioni finali delle ruote, poiché un aumento della grandezza può annullare il vantaggio di un materiale più leggero: incrementi marcati hanno infatti l'effetto di aumentare le masse non sospese. Per questo occorre considerare con attenzione i vantaggi offerti da gomme a basso profilo e gli svantaggi di questo maggior peso.

Più leggera è una ruota, maggiore è la precisione con cui la gomma segue la superficie stradale, cosa che garantisce una marcia uniforme e confortevole.

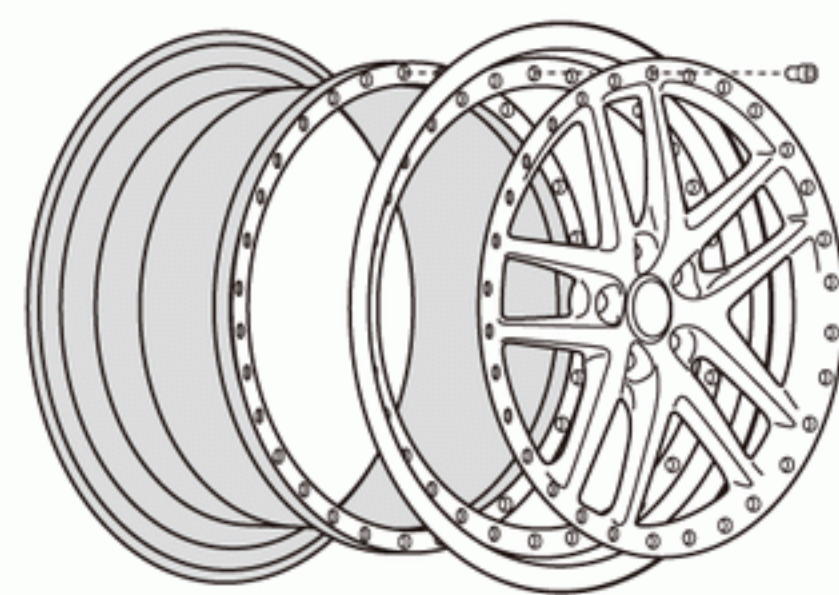
La leggerezza della ruota può anche ridurre l'energia necessaria per far muovere l'auto.

Tipi di cerchi leggeri

Un pezzo

In questo modello di base, cerchione e disco sono realizzati da un unico pezzo di metallo fuso o pressofuso e lavorato con appositi macchinari, garantendo un alto livello di precisione. La varietà di progettazione è limitata, ma la realizzazione da un unico pezzo di metallo garantisce cerchi più leggeri e bilanciati rispetto ai modelli in due o tre pezzi.

Due pezzi

Disco e cerchione sono realizzati separatamente e vengono saldati o uniti con dadi e bulloni. I materiali impiegati per realizzarli possono essere diversi (alluminio, magnesio, titanio o altro), così come i metodi di realizzazione (fusione o pressofusione). Le possibilità in fase di progettazione sono numerose, come pure è maggiore la quantità di offset possibile.

Tre pezzi

Le parti anteriore e posteriore del cerchione sono saldate insieme e il disco viene fissato con bulloni. I modelli in tre pezzi offrono gli stessi vantaggi dello schema a due pezzi, anche se risultano leggermente più pesanti per via dei bulloni. Presentano comunque una libertà di progettazione ancora maggiore. Molto spesso i cerchi dallo stile più ricercato sono realizzati con questo metodo.

Metodi di produzione

Fusione

Questa tecnica consiste nel colare alluminio fuso in uno stampo. Per i cerchi a due e tre pezzi, si ha il vantaggio di poter scegliere fra un'ampia varietà di modelli del disco. Tuttavia, poiché il metallo deve essere sufficientemente spesso per garantire la robustezza, questi cerchi risultano di poco più leggeri di quelli in acciaio. I bassi costi di produzione lo rendono il metodo più usato nella produzione dei cerchi di alluminio.

Forgiatura

Il metallo viene compresso con una pressione di migliaia di tonnellate (fino ad allinearne le molecole), ottenendo un materiale più robusto e compatto, molto più leggero di quelli realizzati tramite fusione, cosa che permette di creare componenti meno spessi e molto leggeri. L'aumento di rigidità comporta una grande resistenza alla tensione, ma una debolezza intrinseca nei confronti della torsione. I costi sono inoltre maggiori e le possibilità di progettazione sono limitate dal processo produttivo. Oltre all'alluminio, vengono usati materiali più leggeri, per esempio il magnesio, diffuso in molte auto sportive.

I molteplici vantaggi di un peso ridotto

Gli effetti dell'aria sul corpo vettura

Il design della carrozzeria può trasformare completamente le prestazioni ad alte velocità, migliorando velocità massima, stabilità ed efficienza. Per questo è molto importante considerare l'aerodinamica della vettura.

Resistenza aerodinamica e portanza

Ad alte velocità, la resistenza aerodinamica ha un impatto notevole: è infatti come un muro di aria che impedisce all'auto di avanzare più velocemente.

Oltre gli 80 km/h, non è più possibile ignorare la resistenza aerodinamica, che aumenta in misura equivalente al quadrato della velocità dell'auto. Se la velocità dell'auto raddoppia, la resistenza aerodinamica viene quadruplicata; se la prima triplica, la seconda aumenta di nove volte. Vi è anche la resistenza al rotolamento delle ruote, che tuttavia non è critica quanto la precedente, poiché se la potenza del motore non riesce a vincere il muro d'aria, l'auto non può comunque andare più veloce. Considerare la resistenza aerodinamica è molto importante sia in auto da gara, che devono raggiungere andature elevate e fornire ottime prestazioni ad alta velocità, sia in auto di serie, che puntano alla massima efficienza.

La resistenza aerodinamica è inferiore per le auto più basse al suolo, con forme slanciate o con frontali a cuneo. Le carrozzerie sinuose, prive di parti sporgenti o di protuberanze, permettono all'aria di passare più liberamente.

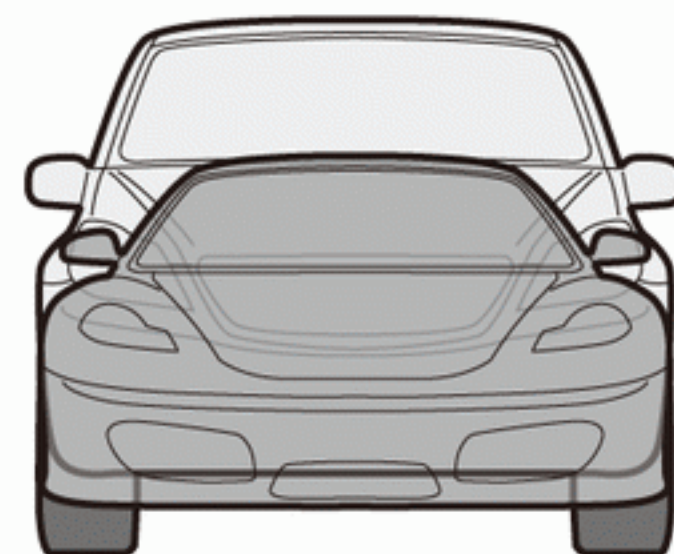
D'altra parte, è importante tenere presente che la maggior parte delle carrozzerie aerodinamiche, viste lateralmente, ha una forma simile a quella delle ali degli aerei, con effetti analoghi: l'aria scorre più velocemente sopra la vettura e più lentamente sotto di essa e questo genera portanza, sollevando il veicolo e riducendo l'aderenza. Dato che eliminare portanza aumenta la resistenza, una carrozzeria progettata in modo efficiente deve trovare il giusto bilanciamento fra resistenza e portanza.

Infine, un altro fattore da considerare è l'impatto di eventuali venti trasversali sull'avanzamento dell'auto. In conclusione, una carrozzeria aerodinamica efficace richiede un equilibrio perfetto fra resistenza aerodinamica, portanza e momento di inerzia.

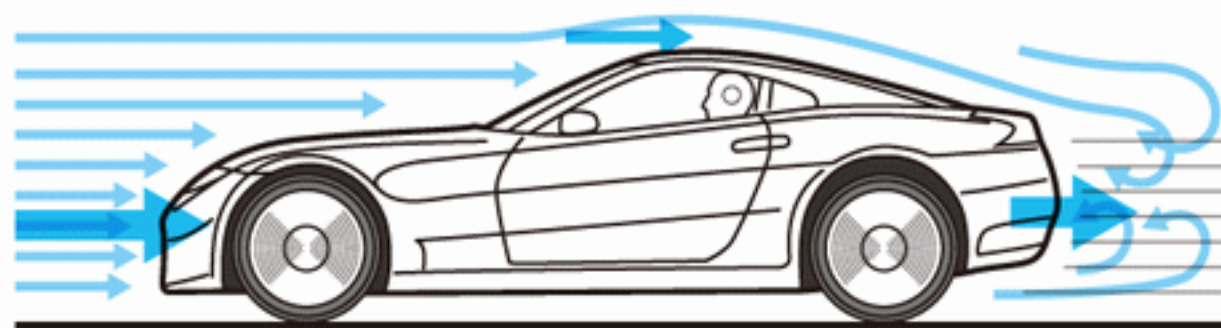
amica

Area proiettata anteriore

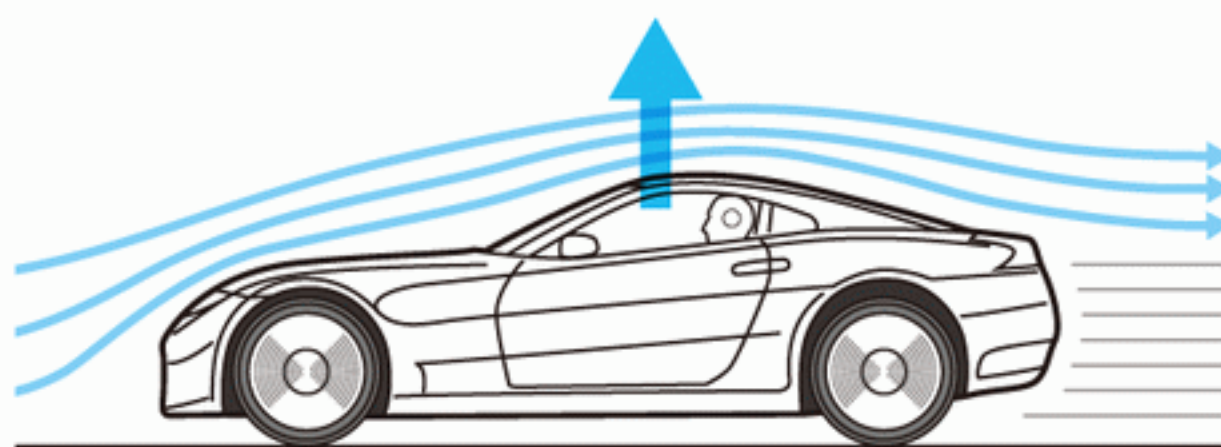
► Area frontale

La silhouette anteriore del corpo vettura. Più ampia è quest'area, maggiore sarà la resistenza aerodinamica. Per questo motivo, le vetture sportive, a differenza delle auto ordinarie o dei furgoni, tendono ad avere un profilo basso, cioè un'area frontale ridotta, che offre minore resistenza al vento.

Cx (coefficiente di penetrazione aerodinamica)

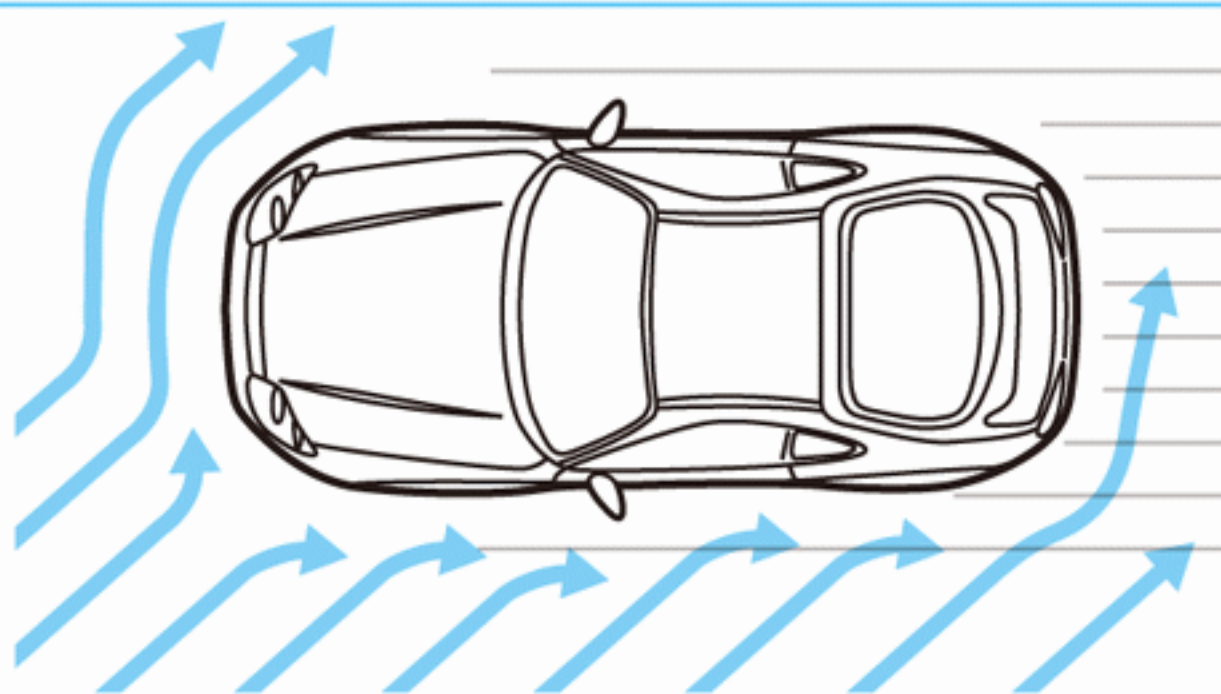
► Resistenza costante

Questo valore indica l'uniformità del passaggio dell'aria sopra un oggetto. È un valore fisso, non influenzato dalla velocità. La resistenza aerodinamica è data dal prodotto del coefficiente di penetrazione aerodinamica per la superficie frontale. In genere, è bassa per le vetture sportive, che presentano un Cx alto e una superficie frontale piccola, ma anche per molte berline, che hanno una superficie frontale ampia, anche in presenza di Cx basso.

Cl, coefficiente di portanza

► Portanza costante

Questo valore rappresenta l'effetto di sollevamento da terra dell'auto, causato dal passaggio dell'aria a velocità elevata. La forza opposta è detta "deportanza" e comporta una maggiore resistenza aerodinamica. Per raggiungere la stabilità è necessario trovare un equilibrio fra deportanza anteriore e posteriore.

Momento d'imbardata

► Coefficiente del momento d'imbardata

Durante la guida, non sempre i venti colpiscono l'auto frontalmente. La forza che si genera al centro della vettura, a seguito della spinta dei venti, e che tende a farla ruotare è definita "momento d'imbardata". Un momento d'imbardata basso, tipico di auto con basso profilo, determina una maggiore resistenza a questi fenomeni. Le vetture con baricentro alto sono le più esposte.

Fattori che riducono le prestazioni ad alte velocità

Analisi: Elaborazione e impostazioni

3

MOTORE

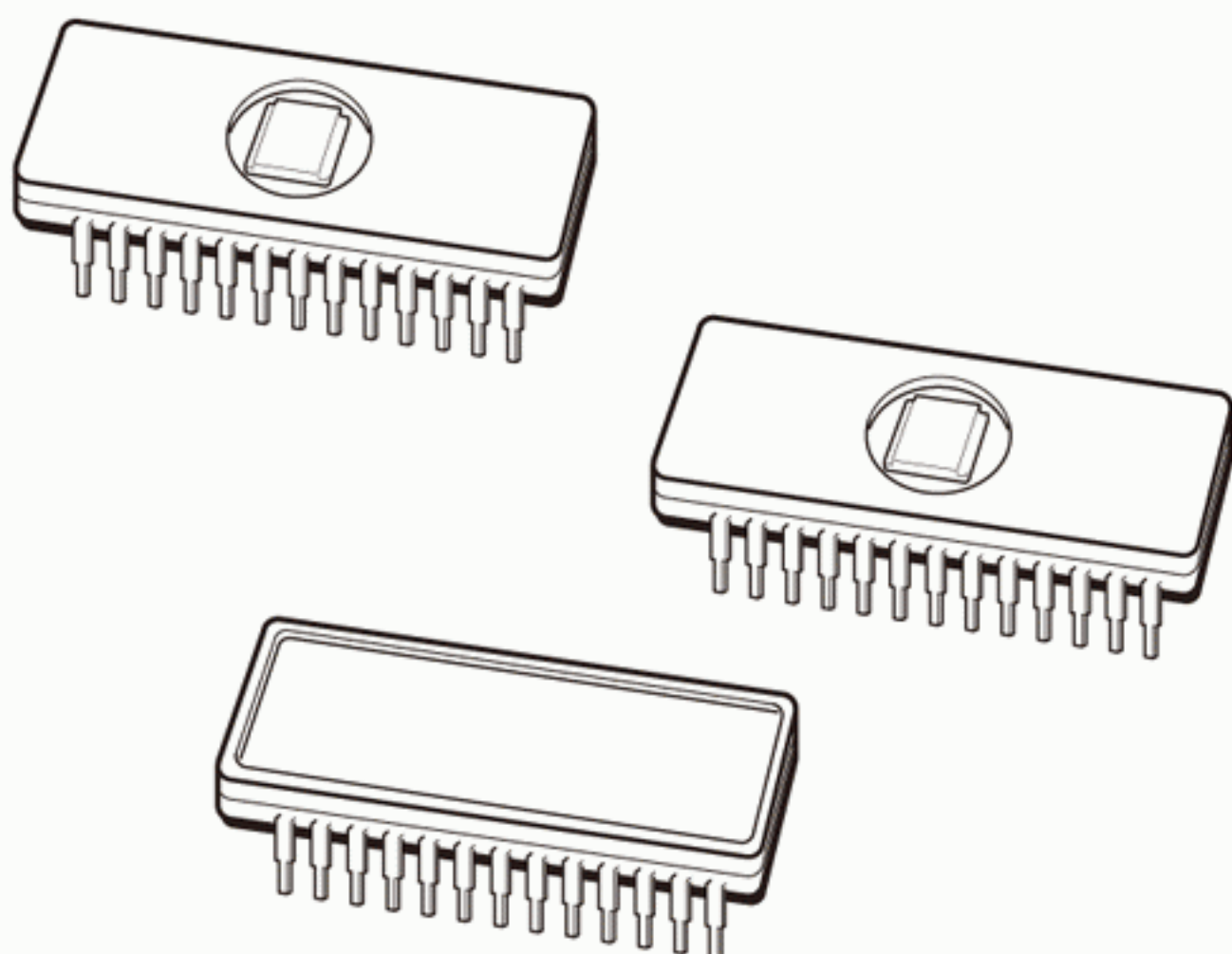
Migliorare le prestazioni del motore

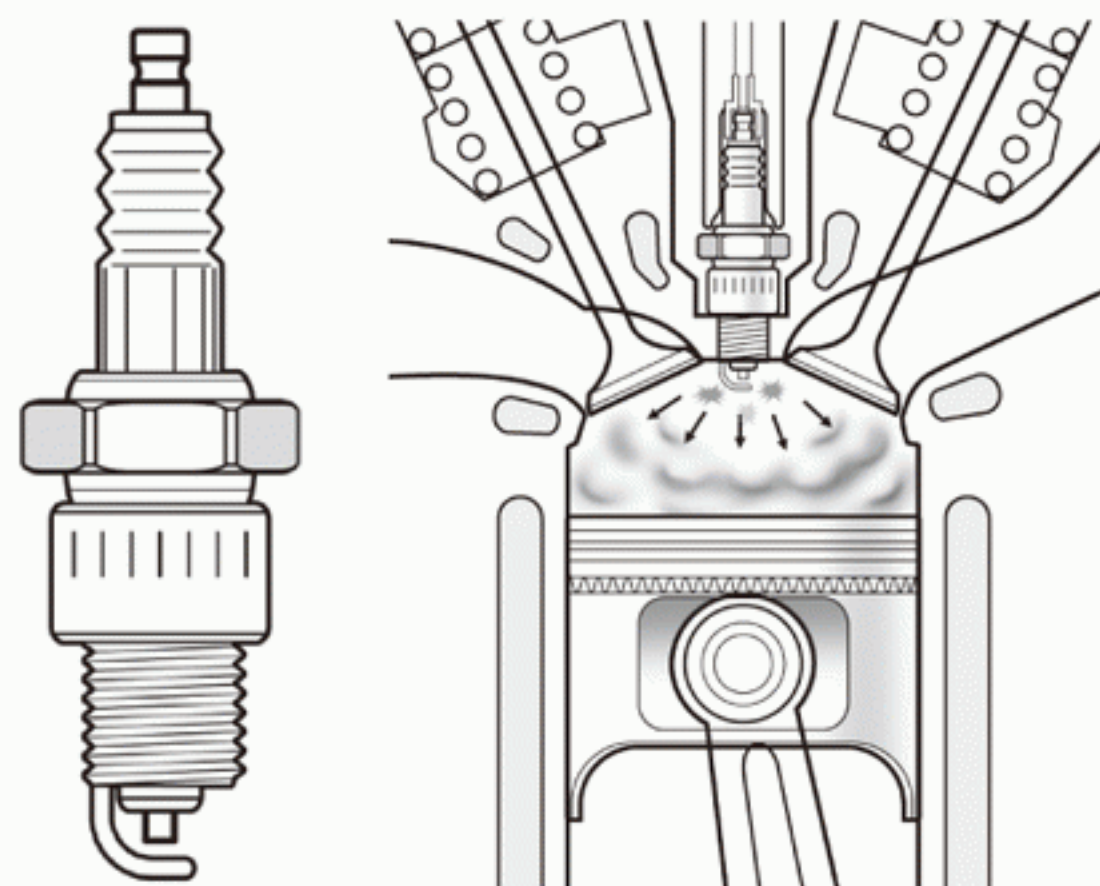
Quando si mette a punto il motore, non bisogna pensare solo alla potenza massima, perché la vettura diventerebbe difficile da controllare e poco efficace sul giro. Bisogna piuttosto trovare la configurazione più adatta alla pista e al proprio stile di guida.

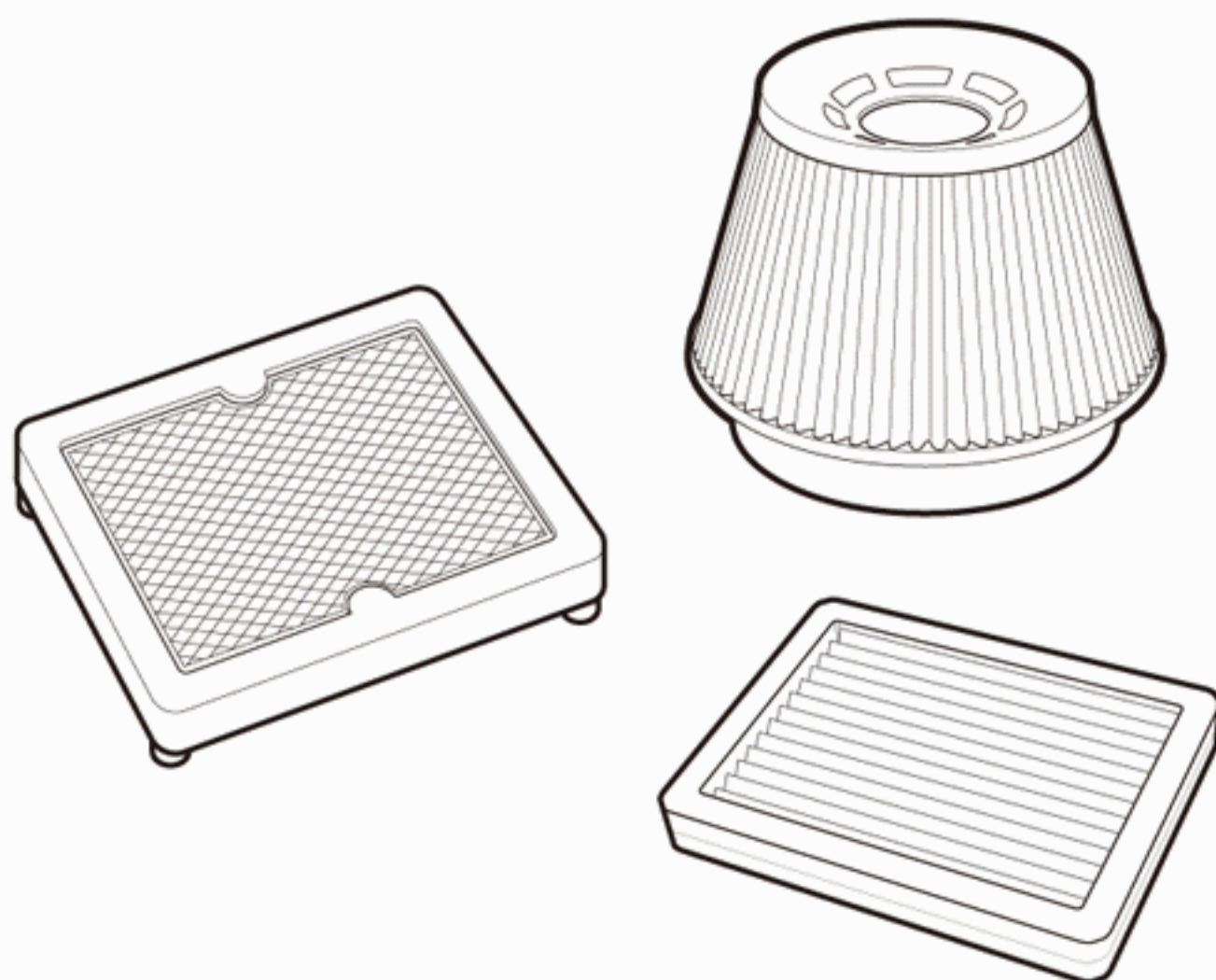
Messa a punto

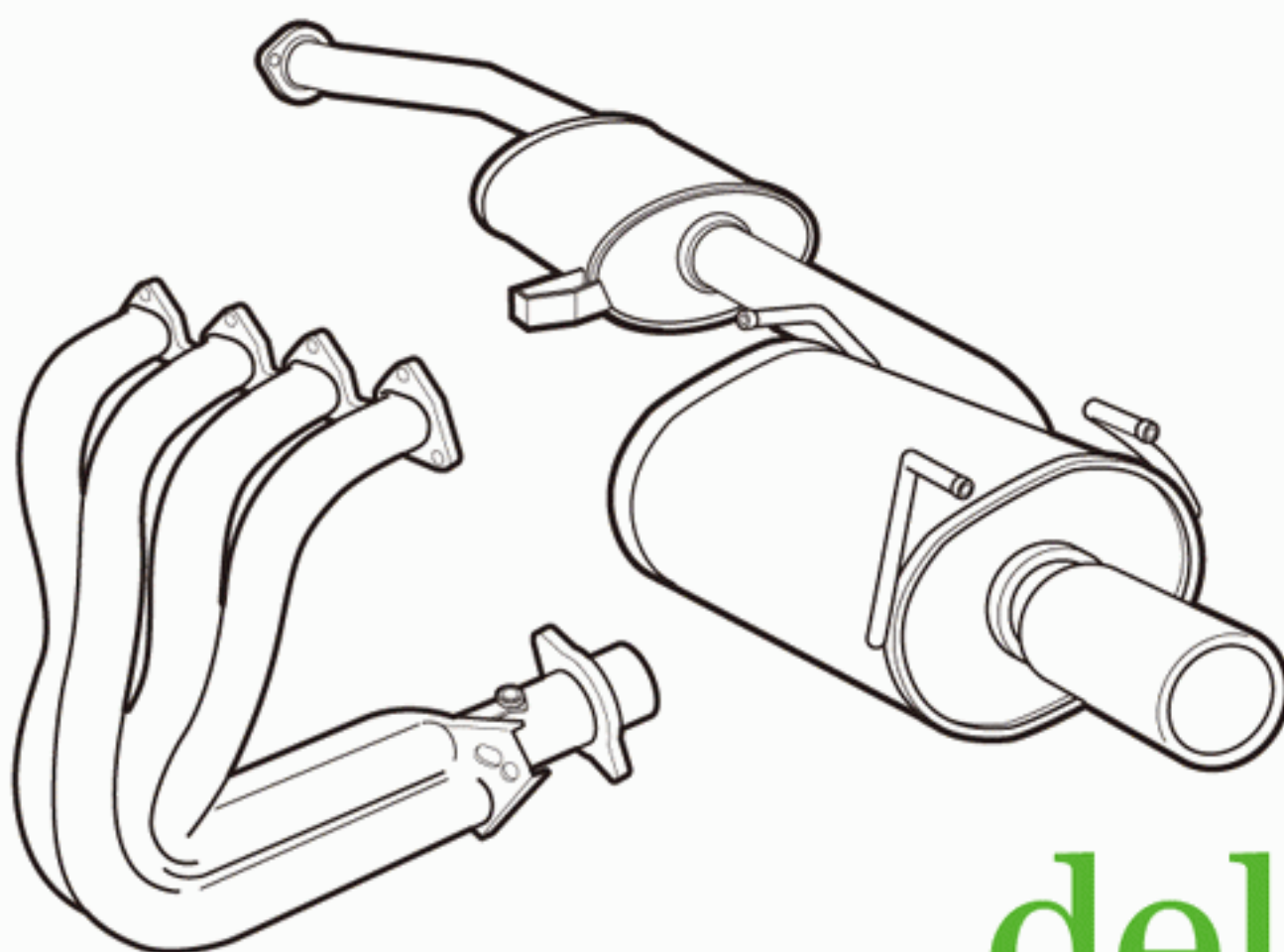
Sostituire la centralina (ECU, Engine Control Unit) e migliorare l'efficienza dello scarico sono due metodi base per migliorare le prestazioni del motore. Dopodiché, si può pensare a operazioni più approfondite, come la messa a punto meccanica e l'aggiunta di un turbocompressore. Anche se queste prime operazioni hanno un impatto minore sulla potenza del motore, ne migliorano il regime di funzionamento e la risposta. Non sottopongono il motore a sollecitazioni troppo elevate, anzi: nelle situazioni di maggiore sforzo, tendono a proteggere il propulsore.

Centralina (ECU)

L'aggiornamento dei dati relativi al controllo del motore e salvati sulla centralina è noto come "mappatura". Con questa procedura si possono calibrare anticipo d'accensione, rapporto aria-benzina, volume di iniezione e variazione della fasatura. Ricordati di aggiornare la mappatura ogni volta che aumenti la pressione di sovralimentazione, cambi componenti di aspirazione o scarico o apporti delle modifiche al motore stesso.

Candele

Delle candele efficaci sono fondamentali per incendiare in modo appropriato la miscela aria-benzina. Anche su un motore di serie non modificato, un utilizzo a regimi elevati può portare delle candele standard a subire sollecitazioni termiche eccessive. Questo rende fondamentale sostituirle con modelli più performanti, una volta elaborato il motore per aumentare la potenza. L'incremento della combustione alzerà la temperatura nella camera dove questa avviene, rendendo più facile il verificarsi di eventi anomali (autoaccensione). Per evitare che questo avvenga, è necessario utilizzare candele in grado di resistere a un livello di calore più elevato.

Filtro dell'aria

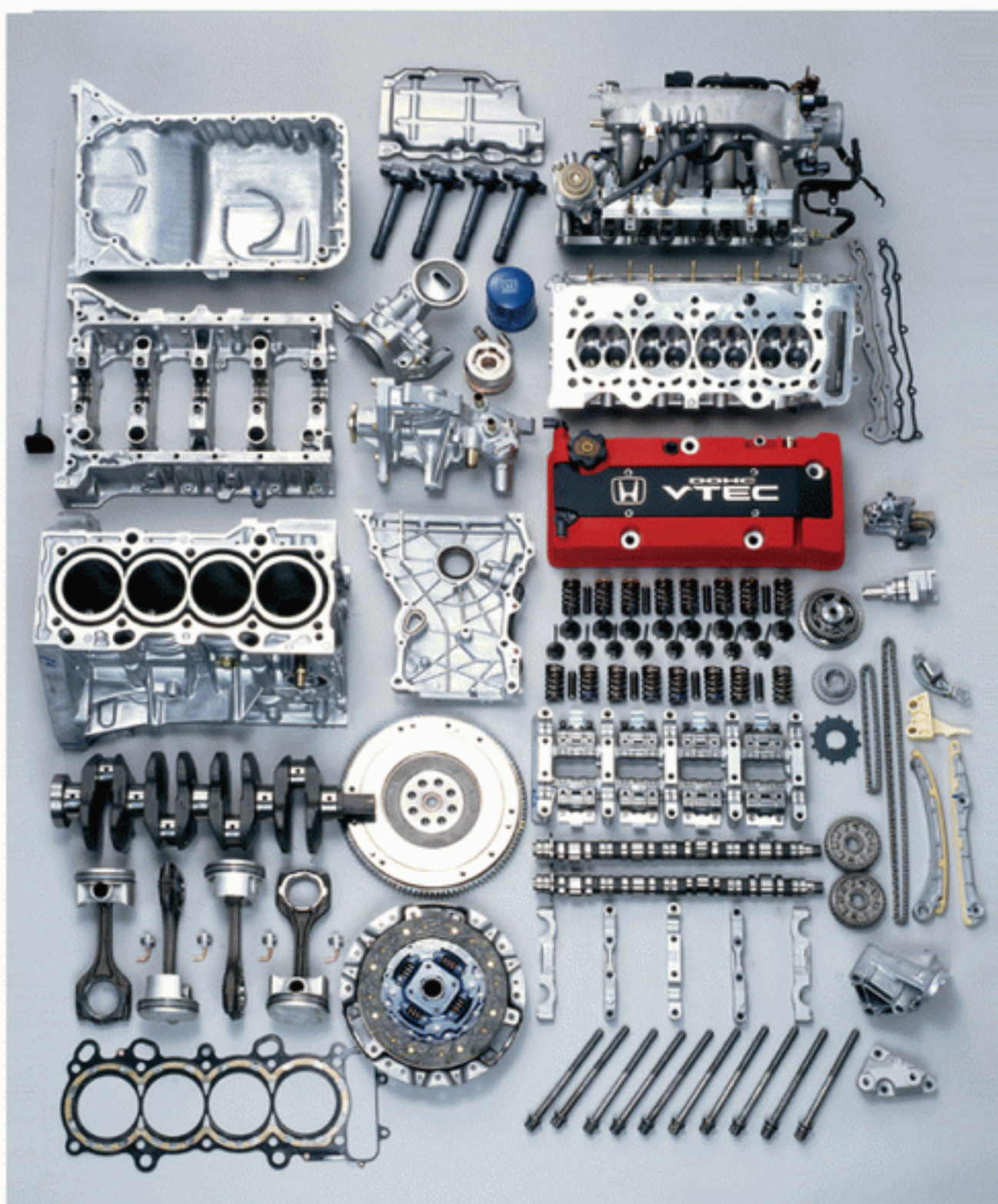
Oltre a impedire a polvere e altre impurità di penetrare nel motore, i normali filtri offrono anche una forte resistenza al flusso dell'aria, impedendo però ai motori sportivi di rendere al meglio. Per questo motivo sono stati sviluppati dei filtri specifici a bassa resistenza, in grado di garantire una risposta più immediata a regimi elevati e una migliore accelerazione. Non farti sorprendere dal rombo prodotto dal motore quando risucchia l'aria!

Scarico

Riducendo la resistenza dello scarico, il motore sarà più elastico nella ripresa e offrirà una migliore risposta in accelerazione. Modificando la marmitta su motori che montano un turbocompressore, utilizzando quindi l'energia dello scarico, si potrà riscontrare un aumento di potenza del 10-20%. Ma attenzione: intervenendo sullo scarico si rischiano ripercussioni negative sulla coppia, per cui è sempre fondamentale avere un'idea precisa del risultato che si desidera ottenere.

Olio motore

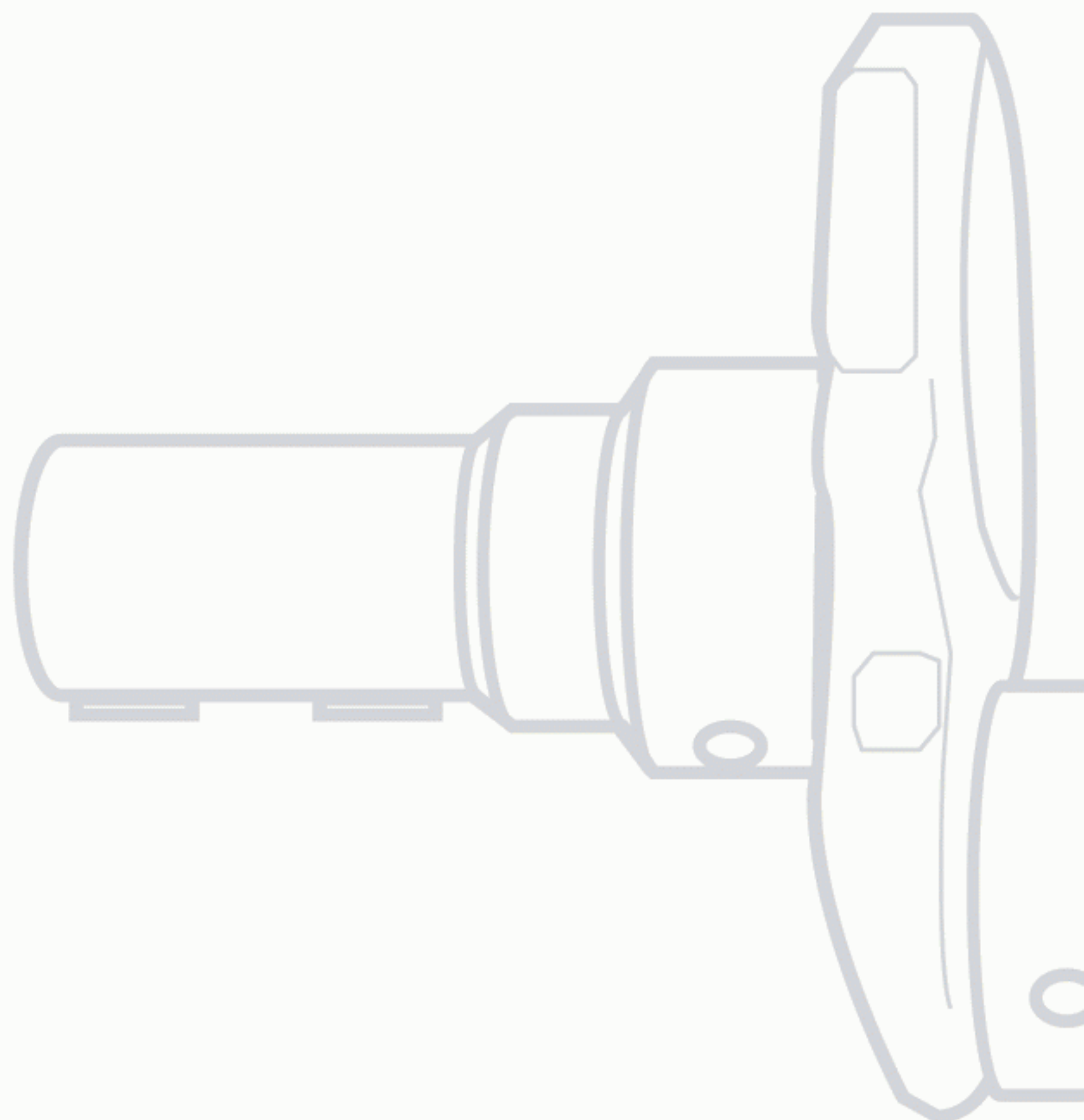
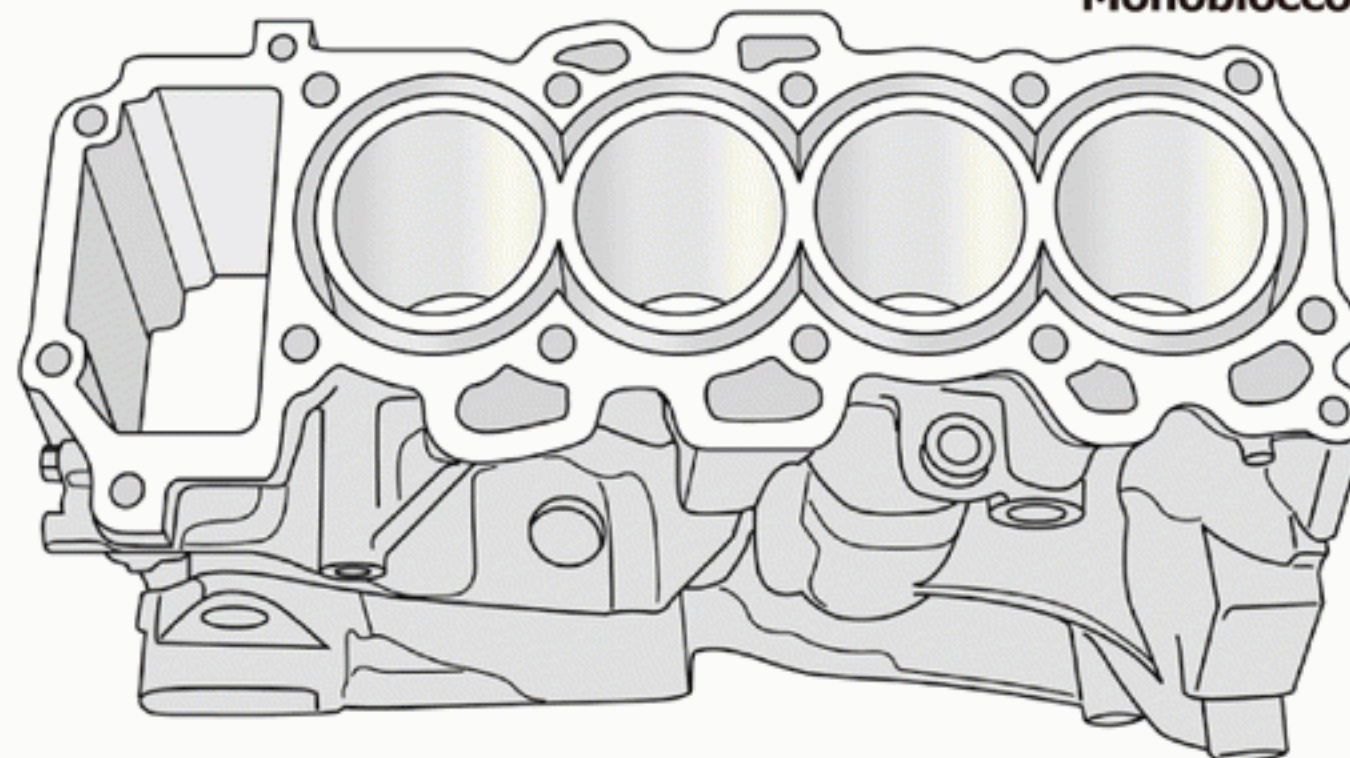
Poiché i motori di grande potenza mettono sotto sforzo elevato i componenti, in particolare per quanto riguarda le parti interne, è indispensabile utilizzare un olio ad alte prestazioni in grado di lubrificarli, raffreddarli e impedire l'accesso dell'aria. Se il sottile strato d'olio che riveste il motore non è uniforme, i cilindri avranno perdite di pressione e potenza, mentre le parti metalliche che si muovono di più finiranno per grippare o per fondersi, a causa della mancata lubrificazione. Un altro fattore chiave è la viscosità, che rischia di aumentare la potenza persa a causa della frizione: gli oli moderni sono solitamente composti chimici di sintesi, capaci di offrire massime prestazioni anche sotto stress, ma dotati di bassa viscosità per limitare gli attriti interni.

Revisionare il motore

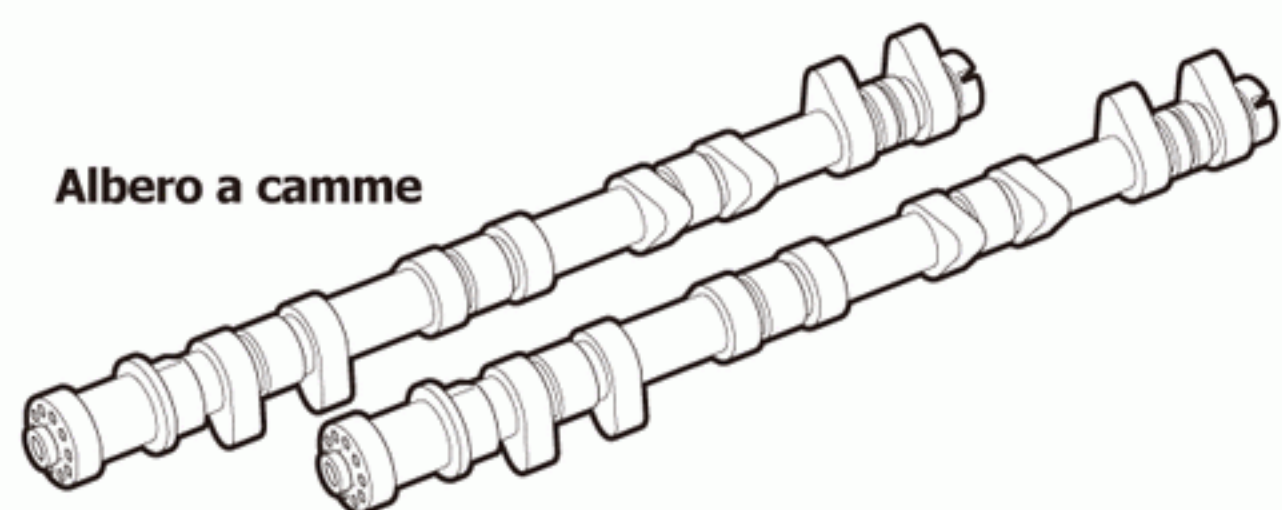
I motori di serie non sono assemblati con livelli di precisione assoluti e queste imperfezioni, talvolta, impediscono loro di raggiungere il massimo potenziale. Un problema che può essere risolto disassemblando il motore nei suoi componenti più piccoli e ricostruendolo con la necessaria attenzione, migliorando le prestazioni generali. Contestualmente, è possibile sostituire alcune componenti con altre più leggere, bilanciarle fra di loro per incrementare i benefici ottenuti e, se l'operazione non è resa impossibile da regolamenti o limiti del propulsore, addirittura aumentare la cilindrata per migliorare coppia e potenza erogata senza andare ad aumentare il carico di stress imposto al motore.

Inoltre, la progettazione dei motori moderni è così minuziosa da non lasciare spazio a grandi miglioramenti in fase di riconfigurazione.

Aumentare la cilindrata

È il metodo più efficace per migliorare le prestazioni in fase di messa a punto: la potenza del motore cresce parallelamente al volume di miscela aria-benzina bruciato. Questa operazione viene realizzata in due modi: aumentando il diametro di cilindri e pistoni o "aumentando" la corsa del pistone mediante la sostituzione dell'albero a gomiti e delle bielle. Anche se entrambi i metodi migliorano la cilindrata, gli effetti sono diversi: l'incremento del diametro aumenta i giri del motore e fornisce più potenza in uscita, mentre quello della corsa rende disponibile più coppia a regimi medi e bassi. Con il progressivo alleggerimento dei motori, i blocchi dei cilindri sono tuttavia diventati più sottili, per cui aumentarne il diametro risulta sempre più difficile.

Monoblocco

Bilanciamento

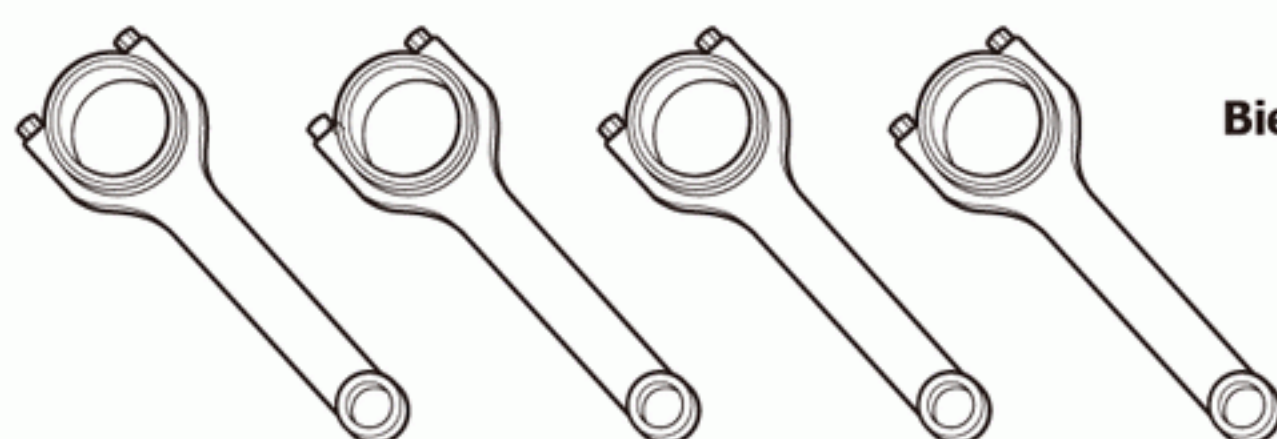
In un normale motore, il peso dei pistoni e delle bielle varia leggermente da cilindro a cilindro. Inoltre, l'eventuale presenza di piccole deviazioni nella rotazione dell'albero a gomiti può generare delle resistenze, che vanno a ridurre notevolmente la potenza. Pesando attentamente ogni componente, verificando la loro uniformità di peso e ottimizzando il movimento dell'albero a gomiti, il motore può funzionare in modo più fluido ed efficiente, raggiungendo una maggiore potenza in uscita. Se non fosse sufficiente modificare un componente per correggere le differenze di peso, si può sempre sostituirlo completamente, operazione particolarmente utile nelle gare monomarca, che non permettono che modifiche sostanziali della vettura.

Albero a camme

Ridurre il peso

Diverse parti del motore si muovono molto velocemente e, sottoposte all'inerzia, possono perdere potenza a causa dell'attrito. Questo fenomeno può essere limitato rimuovendo parte del materiale per alleggerirle, un procedimento che in genere si affianca a quello del bilanciamento. Tuttavia, se le parti sono troppo sottili, si rischia un consumo più rapido.

Rafforzamento

Quando il motore subisce una messa a punto significativa, tutte le sue parti vengono sottoposte a sforzi maggiori, con il conseguente rischio di rotture. È quindi importante che i componenti siano resistenti e allo stesso tempo leggeri, risultato conseguibile utilizzando parti rinforzate con moderne tecniche di forgiatura e nuovi materiali come le leghe di titanio, ottenendo così una leggerezza che si accompagna a una robustezza superiore alla norma. Nel mondo delle corse e nei motori elaborati è ormai comune l'uso di pistoni di alluminio e di bielle in lega di titanio.

Pistoni

Bielle

Sfruttare a fondo il potenziale di una vettura

Aumentare il regime di rotazione

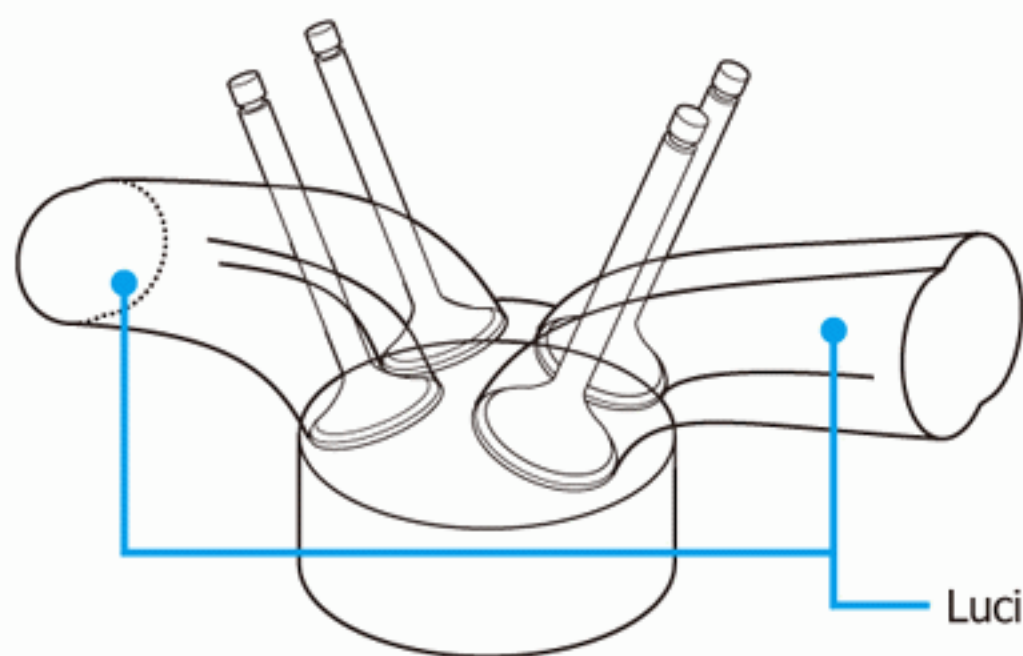
La potenza in uscita è data dalla combinazione di coppia e giri del motore (potenza = coppia x RPM). Aumentando il regime di rotazione di un motore, aumentiamo anche la sua potenza in uscita. Un obiettivo che si raggiunge lavorando sulle testate e migliorando l'efficienza di prese e scarichi agli alti regimi, solitamente grazie all'albero a camme ad alzata elevata. Sebbene i componenti intorno alle valvole debbano essere rinforzati, l'effetto è simile a quello che si otterrebbe aumentando le dimensioni di prese e scarichi d'aria, con una potenza notevolmente maggiore ad alti regimi. Questo sistema è particolarmente efficace per i motori a corsa breve, che hanno un flusso dell'aria efficiente ma una velocità dei pistoni meno elevata rispetto a quelli a corsa lunga.

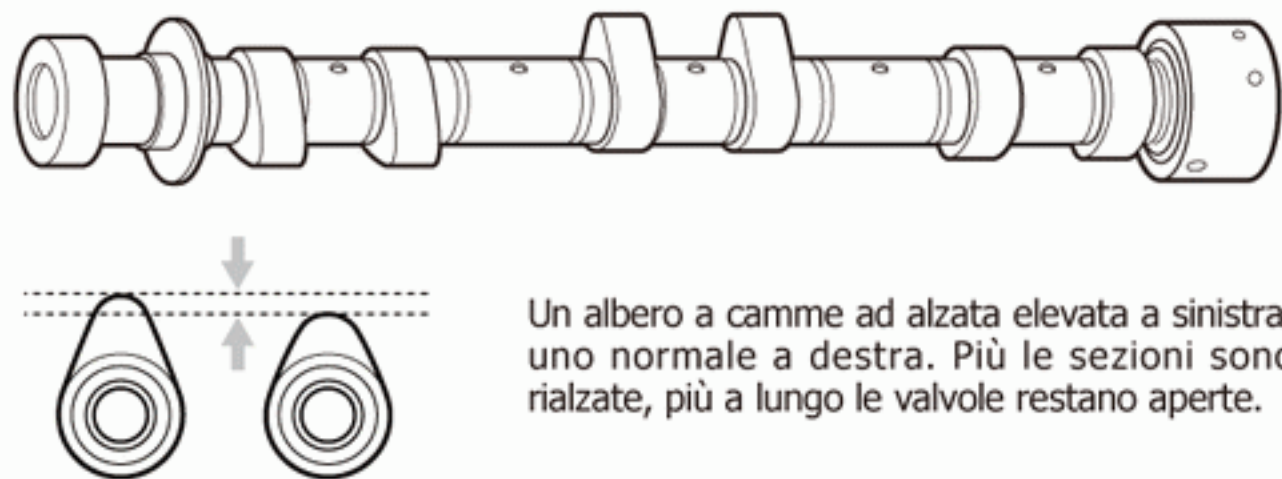
Passando a un albero a camme ad alzata elevata, il motore raggiungerà regimi più elevati e una potenza maggiore. Questa operazione, tuttavia, ridurrà notevolmente la coppia ai medi e bassi regimi: alcuni tipi di motore da gara potrebbero perfino non riuscire a ottenere un minimo costante.

Aumentare il regime di rotazione per una maggiore potenza

Luci

Le luci di aspirazione e scarico permettono l'entrata della miscela aria-benzina nel motore e l'uscita dei gas di scarico, una volta avvenuta la combustione. Il flusso che li attraversa dovrebbe essere il più possibile scorrevole, ma capita spesso che, principalmente per motivi di costo, i motori di serie presentino superfici metalliche scabre, condotti distorti, luci di dimensioni irregolari, ecc. Lucidando queste superfici, si può ottenere un flusso d'aria più scorrevole: già così la resa del propulsore a regimi elevati migliora, ma per ottenere il massimo risultato è necessario elaborare la testata, procedendo alla sua levigatura e alla sostituzione delle camme.

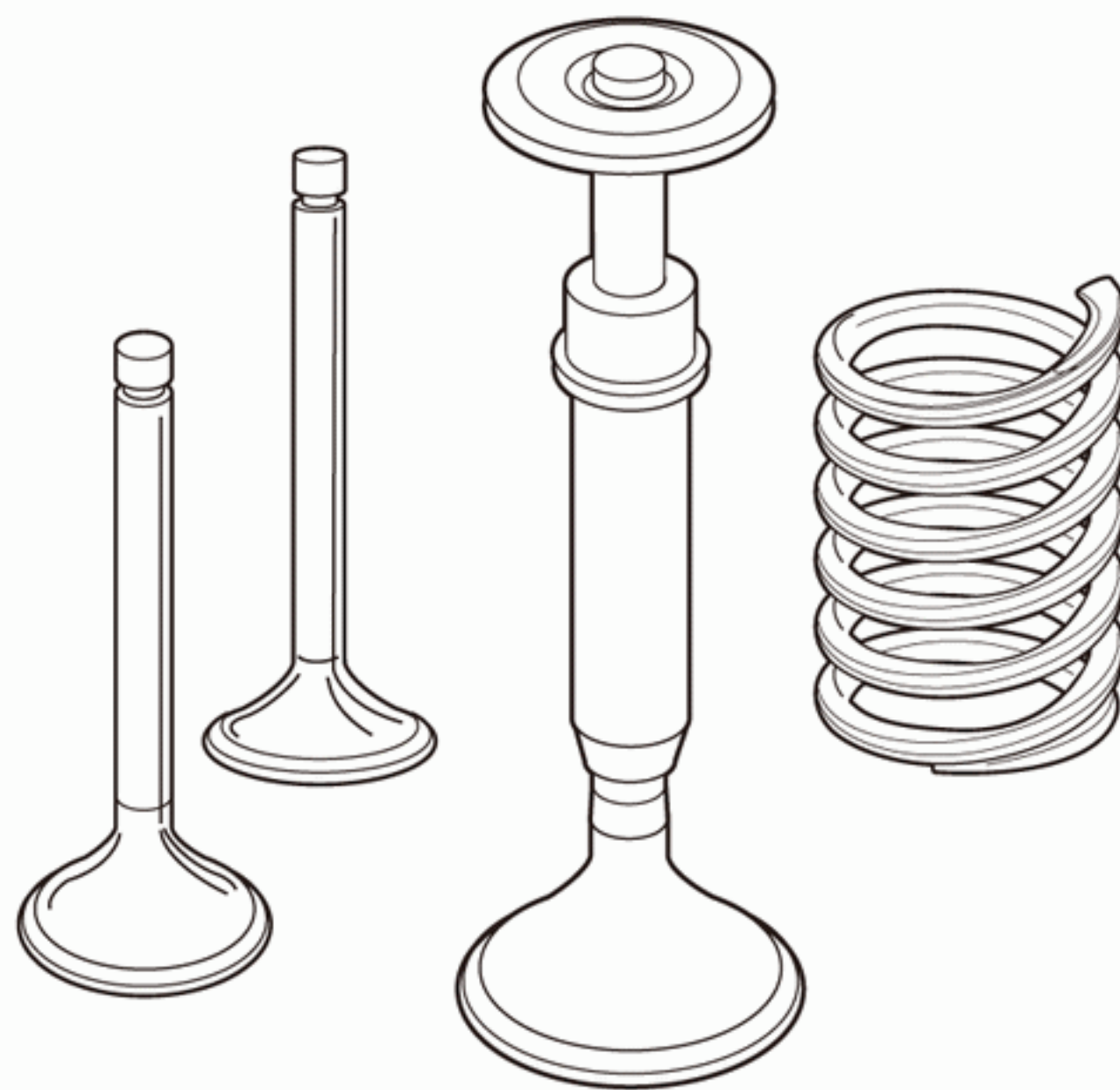
Luci

Albero a camme

L'albero a camme è l'albero che apre e chiude le valvole di aspirazione e scarico. Un albero a camme ad alzata elevata è realizzato in modo da mantenere le valvole aperte più a lungo. I risultati sono equivalenti all'ingrandimento delle luci: si riduce la coppia ai regimi bassi e medi, ma si aumenta in modo netto la potenza a quelli elevati. Pur riducendo la guidabilità a causa dell'improvviso aumento di potenza al salire del numero di giri, questa tecnica è spesso utilizzata quando si vuole ottenere maggiore potenza da un motore aspirato.

Un albero a camme ad alzata elevata a sinistra, uno normale a destra. Più le sezioni sono rialzate, più a lungo le valvole restano aperte.

Valvole

Quando si lucidano le luci e si sostituiscono le camme, è utile aumentare anche le dimensioni delle valvole. Questo metodo di elaborazione consente di allargare le aperture delle valvole, lasciando entrare più aria nei cilindri e migliorando l'efficienza di aspirazione. Le valvole più pesanti sono maggiormente soggette all'inerzia, ma il problema può essere risolto scegliendo materiali ultraleggeri, per esempio il titanio.

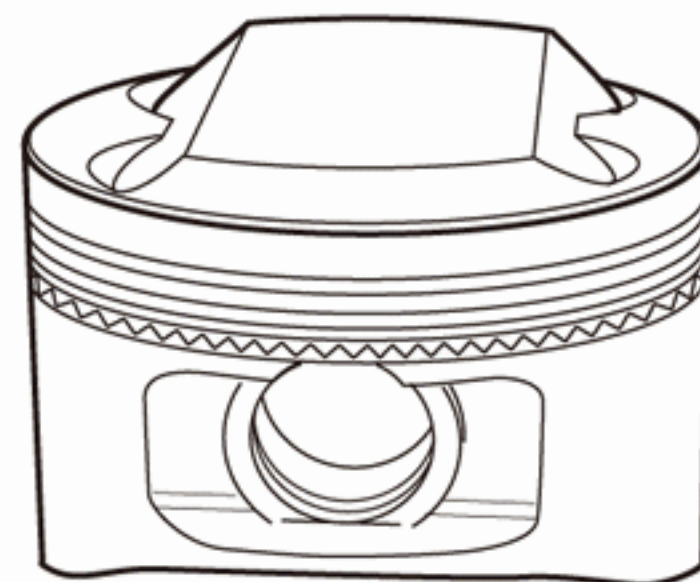
Molla delle valvole

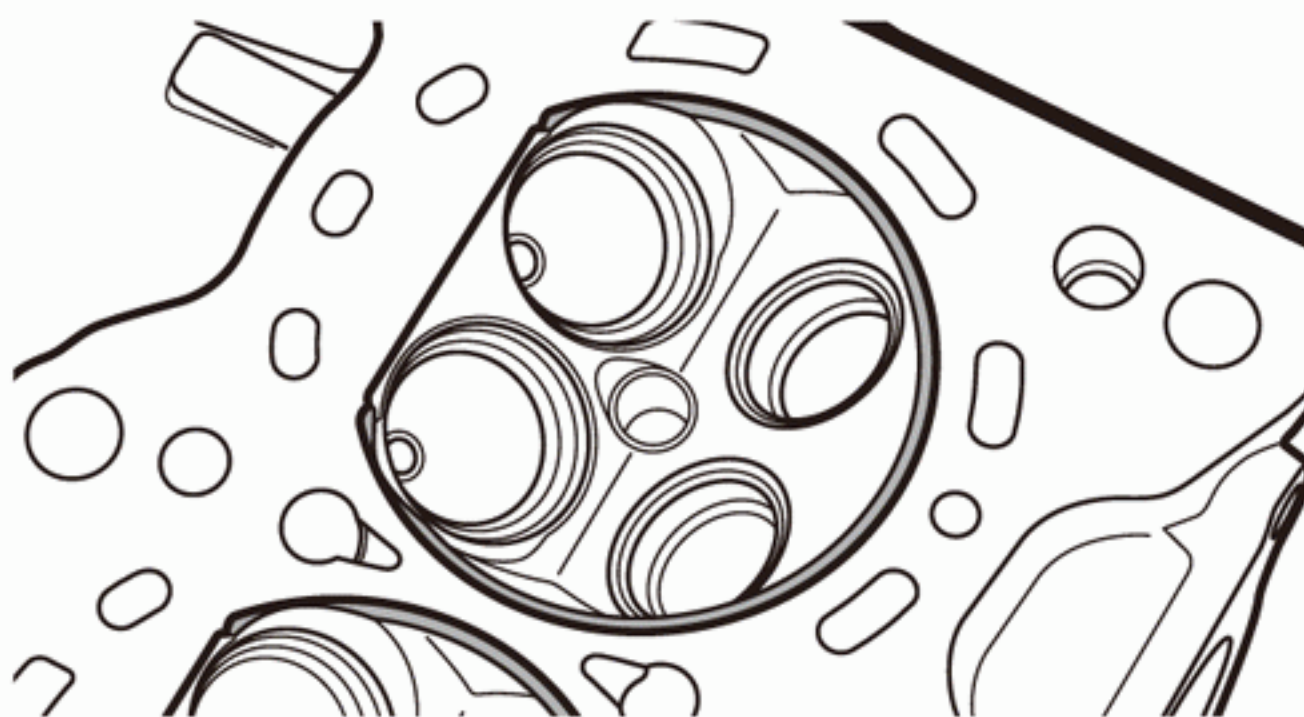
Regimi di rotazione elevati possono creare vibrazioni nelle molle che chiudono le valvole, impedendo alle loro espansioni e contrazioni di tenere il passo con il movimento dell'albero a camme. Un motore potenziato ha quindi bisogno di valvole migliori, soprattutto quando monta un albero a camme ad alzata elevata, in modo da evitare eventuali rischi di blocco o di collisione tra valvola e pistone. Lo svantaggio nell'utilizzo di molle più robuste è che queste aumentano la resistenza e provocano il logorio dell'area intorno alle valvole stesse.

Aumentare la compressione

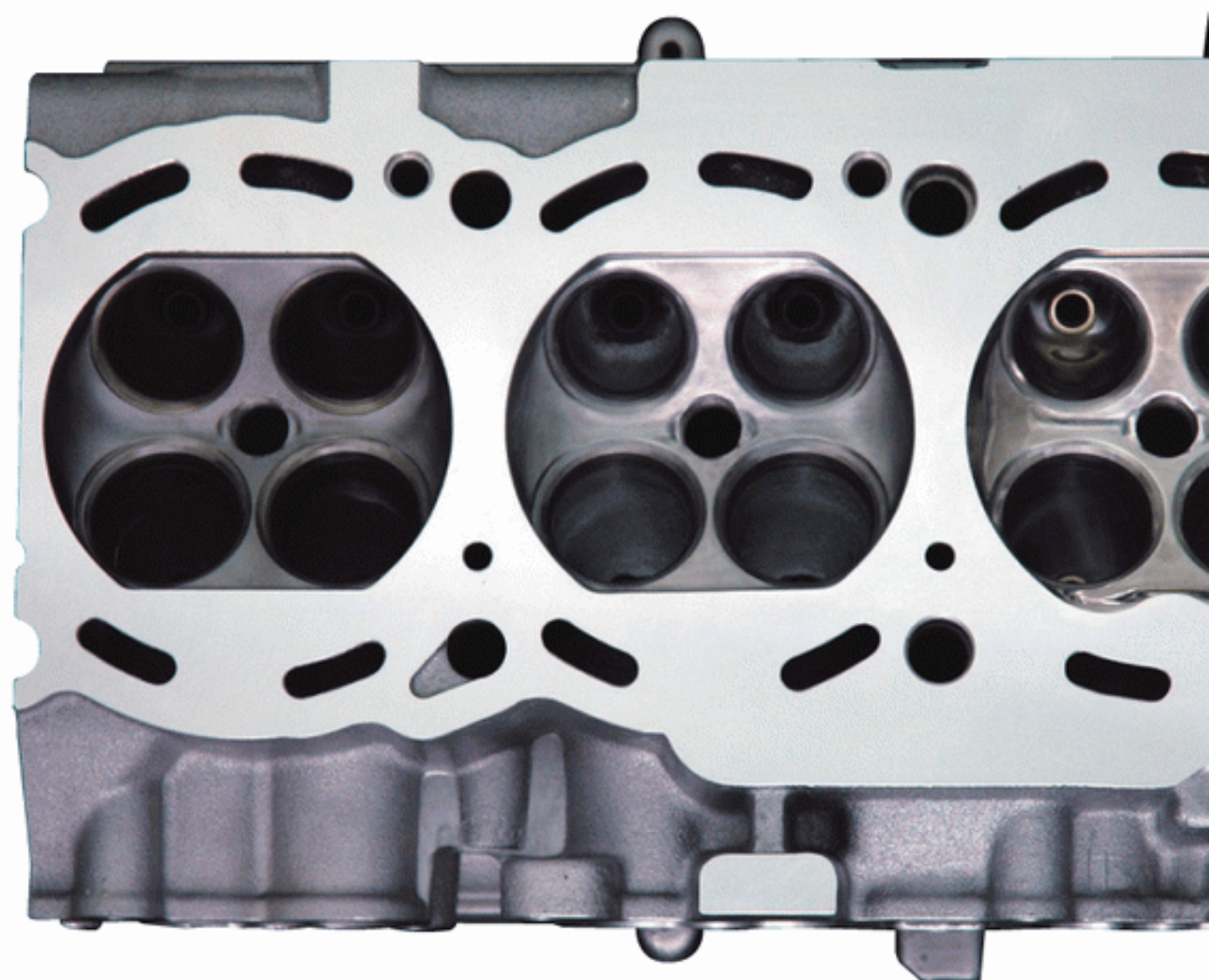
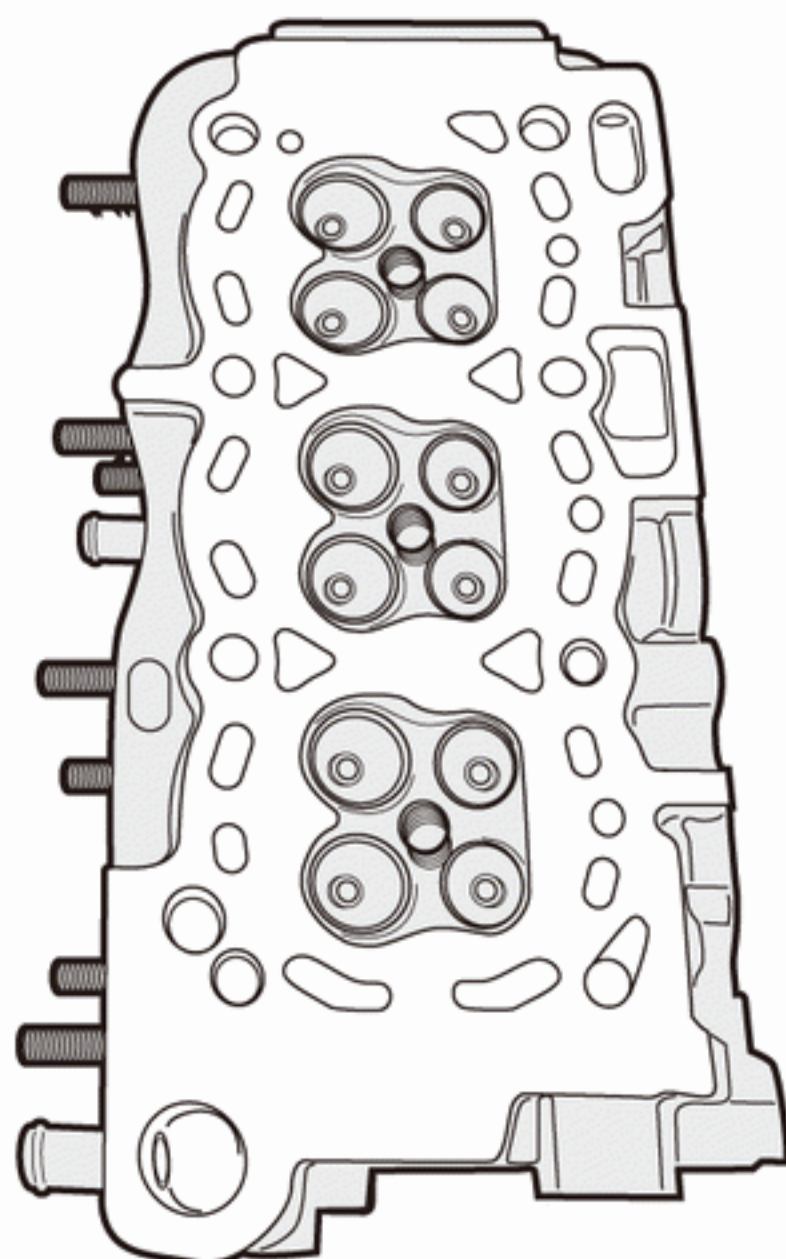
Maggiore è il livello di compressione della miscela di aria-benzina che un motore è in grado di aspirare, più potente sarà la combustione e, di conseguenza, la potenza e la coppia generata. Questo tipo di elaborazione si effettua principalmente modificando la capacità della camera di combustione nel cilindro, situata nella testa dello stesso. Aumentando eccessivamente il livello di compressione, tuttavia, aumenta la resistenza del motore, il che può portare a una combustione anomala. I motori ad alta compressione richiedono una serie di modifiche per evitare che questo accada, come la regolazione della quantità di benzina in entrata nel cilindro, la sostituzione delle candele per ritardare la combustione e il rafforzamento di pistoni e bielle per far fronte all'aumentata potenza del motore.

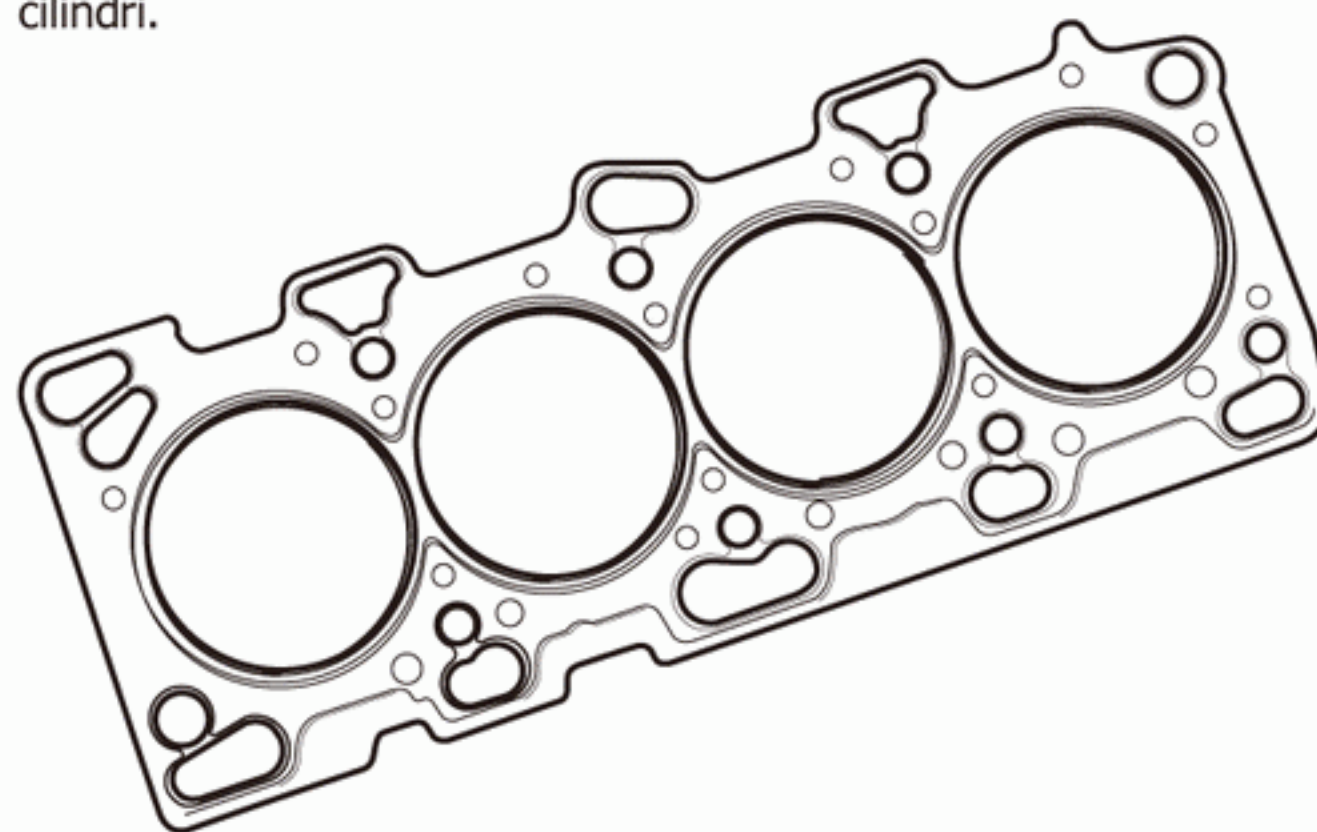
Pistoni

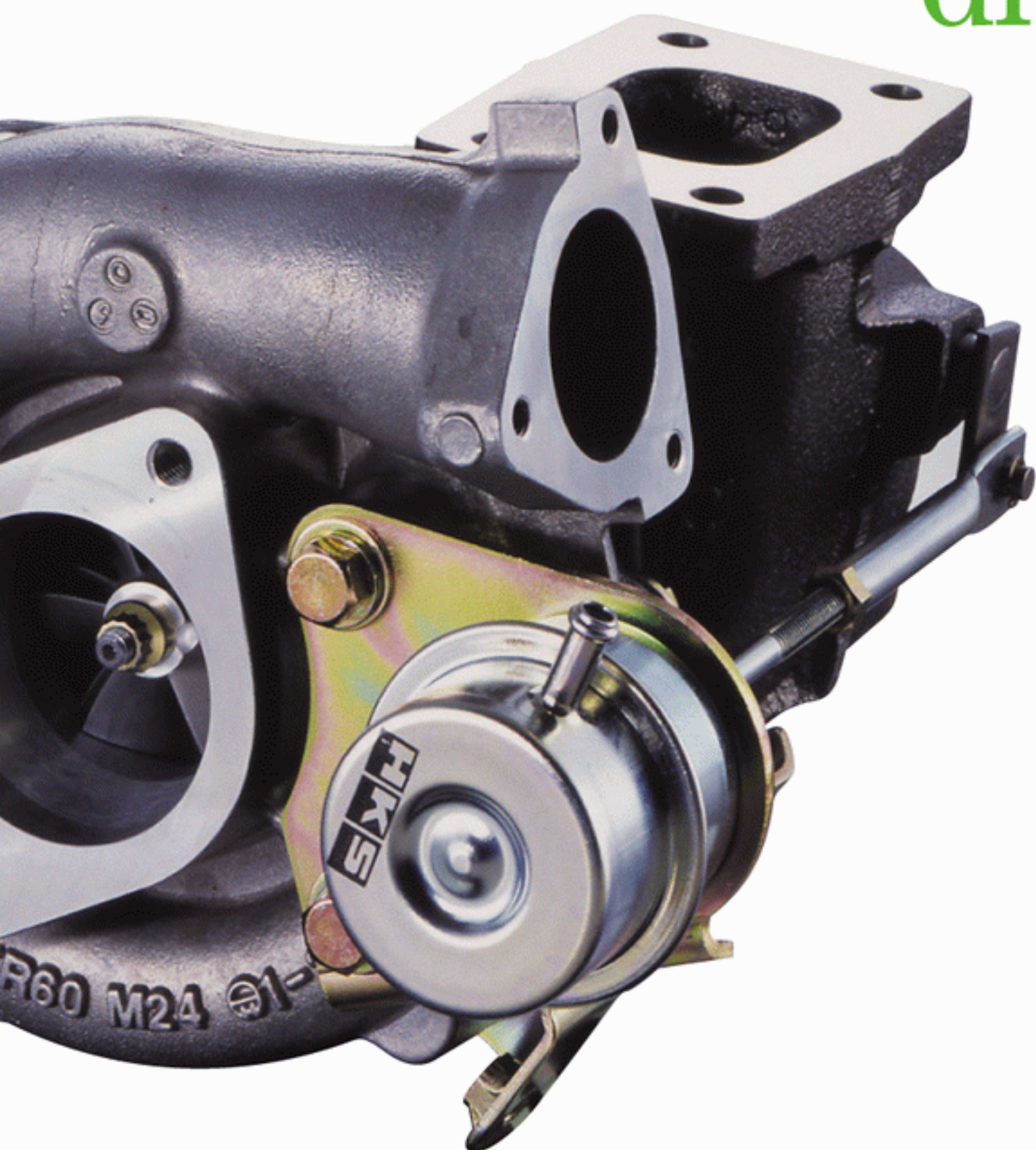
Il sistema più comune per aumentare il rapporto di compressione è quello di passare a pistoni ad alta compressione. Come è possibile notare dalla loro sommità rialzata, la camera di combustione è più piccola di quella di un pistone normale, il che aumenta il rapporto di compressione. Questo porta però ad avere una miscela aria-benzina più calda e temperature più elevate in fase di combustione, rendendo più frequente il "battito in testa", ovvero una combustione incorretta. È necessario quindi prendere misure preventive, come il miglioramento del flusso della miscela aria-benzina.

L'aumento della compressione dovrebbe avvenire in parallelo con l'aumento del regime di rotazione del motore. Inoltre, la combustione più violenta del carburante richiede un irrobustimento interno del motore.

Camera di combustione

Le camere di combustione possono essere modificate in vari modi: la realizzazione di un cielo spiovente è una tecnica molto comune e migliora il flusso dell'aria e l'efficienza di combustione, ma quella più diffusa per evitare il battito in testa è la realizzazione di una camera di combustione schiacciata. Queste rientranze sono situate nella camera di combustione, dove si concentra la compressione, e possono pertanto ridurre leggermente il rapporto della medesima. Discrepanze nel volume delle singole camere di combustione sono però possibili: occorre quindi verificarle attentamente per assicurarsi che siano bilanciate.

Testata

La parte inferiore di una testata può essere limata in incrementi di 0,1 mm per ridurre gradualmente la capacità della camera di combustione, aumentando così il rapporto di compressione. Questo corregge eventuali deformazioni che possono avvenire a temperature estremamente elevate, ripristinando la tenuta tra monoblocco e testata e ovviando a eventuali problemi di perdita di compressione.

Guarnizione della testata

La guarnizione della testata, collocata tra il monoblocco e la testata, assicura una buona aderenza e previene la perdita di compressione. La riduzione del suo spessore ha lo stesso effetto della limatura della testata: riduce la capacità della camera di combustione e aumenta il rapporto di compressione. Le guarnizioni della testata sono generalmente in acciaio inossidabile, un materiale resistente che vanta un'alta conducibilità del calore. I livelli di compressione possono così essere ottimizzati ed è possibile evitare perdite di pressione nei cilindri.

Aumentare la potenza esplosiva

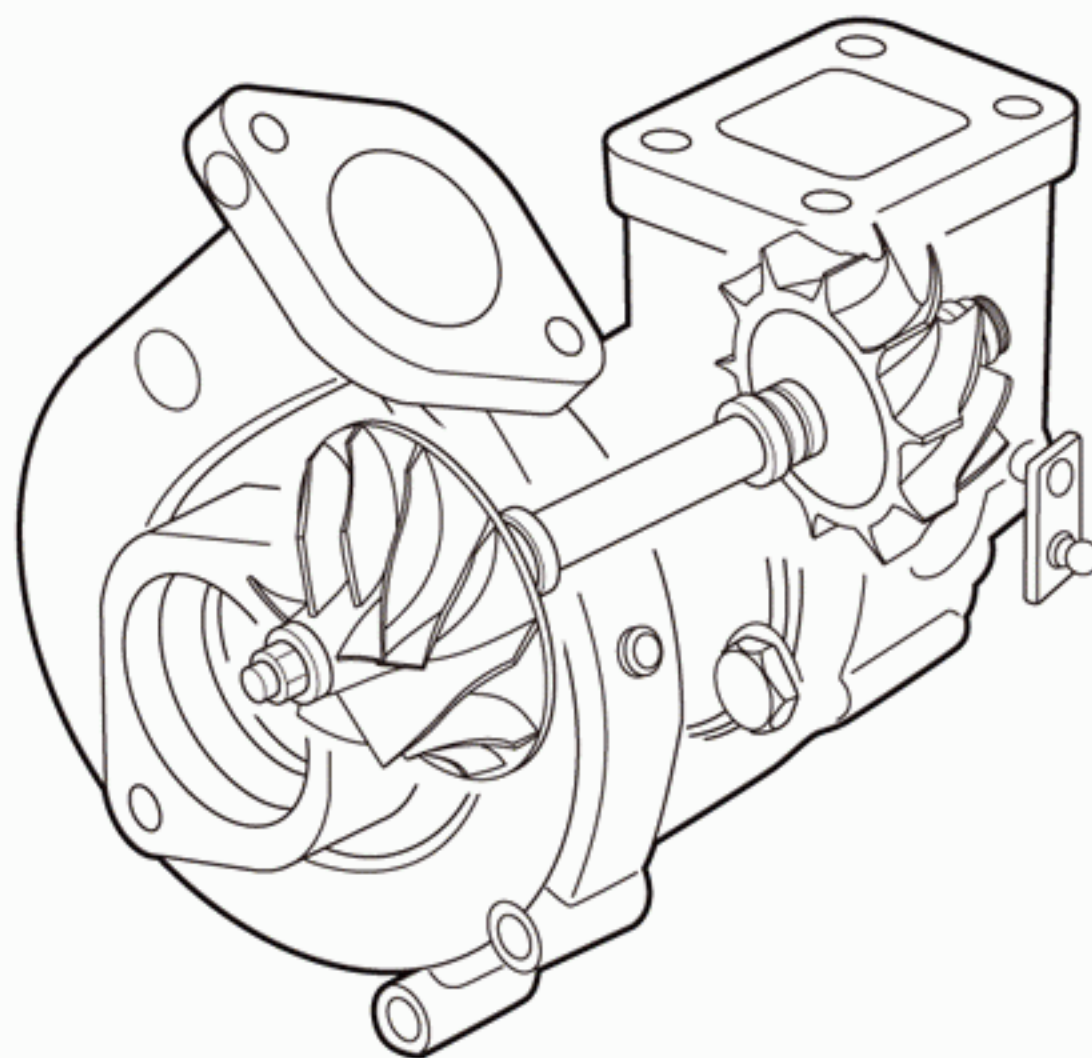
Immettere grosse quantità di aria compressa

Pressione di compressione

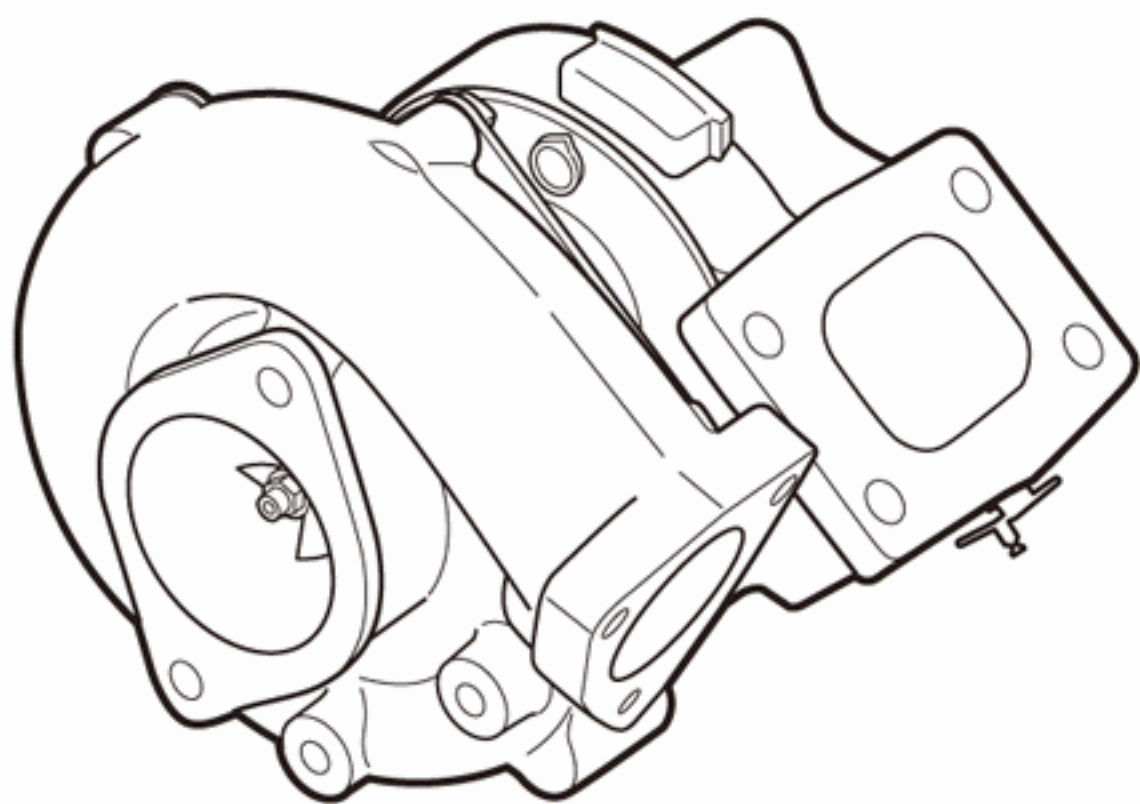
La pressione di compressione, espressa in kg/cm^2, kPa o psi, indica il volume d'aria aspirato da un turbocompressore e la compressione a cui questa è sottoposta. Più è elevato il suo valore, maggiore sarà la potenza ottenuta. Tuttavia, più aria si aspira, più benzina sarà richiesta per miscelarla. Bisognerà riconfigurare la centralina in modo da aumentare l'erogazione di carburante, oppure installare un iniettore per aumentare la portata del flusso. Inoltre, sarà essenziale rafforzare il motore per far fronte allo sforzo causato dalla maggiore potenza esplosiva.

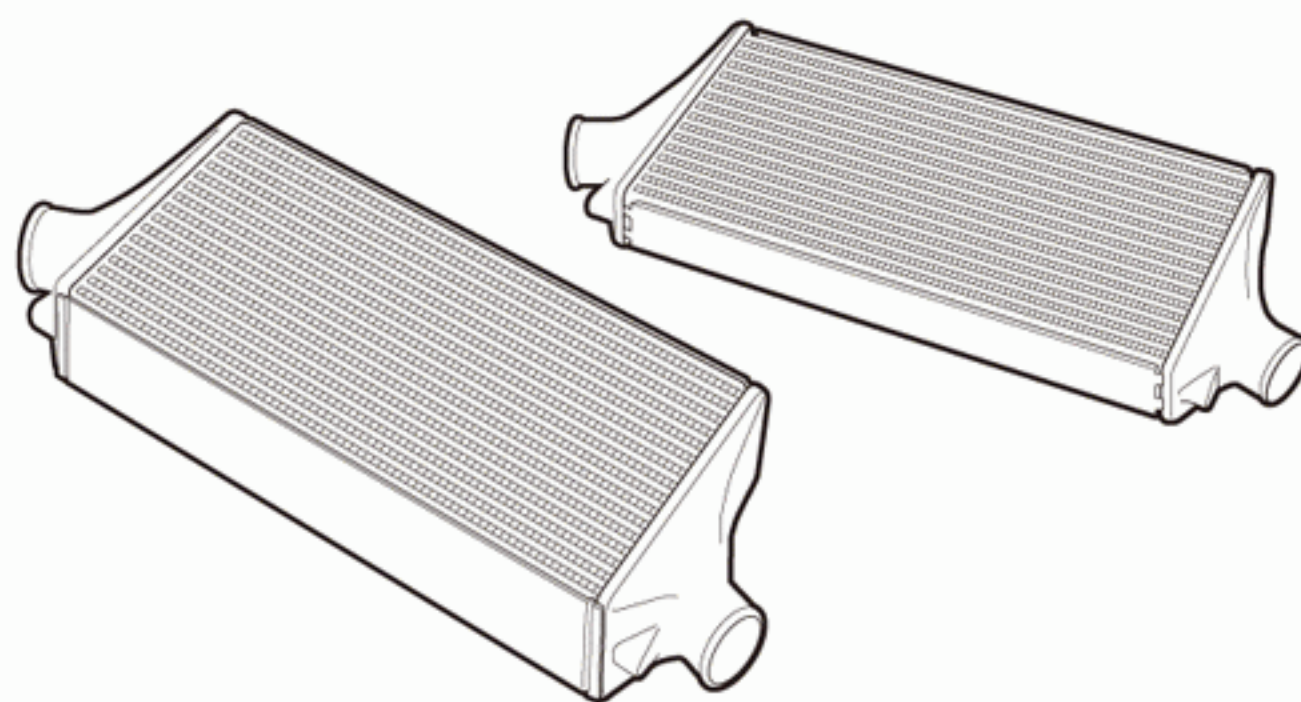
Turbine ad alto flusso

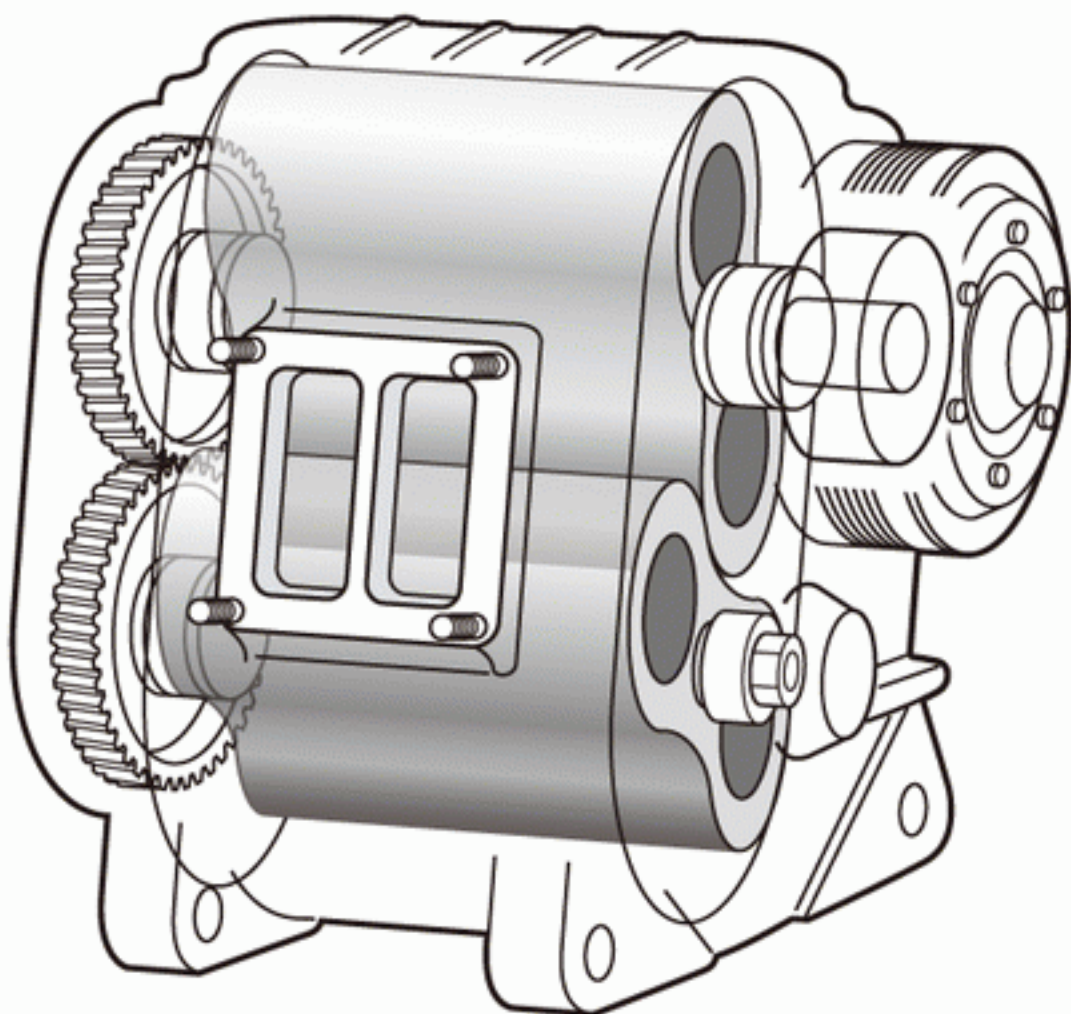
Aumentando le dimensioni della spirale, che comprime l'aria immessa in un compressore, si ottiene un flusso maggiore. Un procedimento noto come "riduzione" può essere utilizzato per ridurre l'inerzia che agisce sulla turbina, applicando così la pressione in modo più rapido. Questo permette di aumentare la potenza in uscita con una perdita di risposta minima.

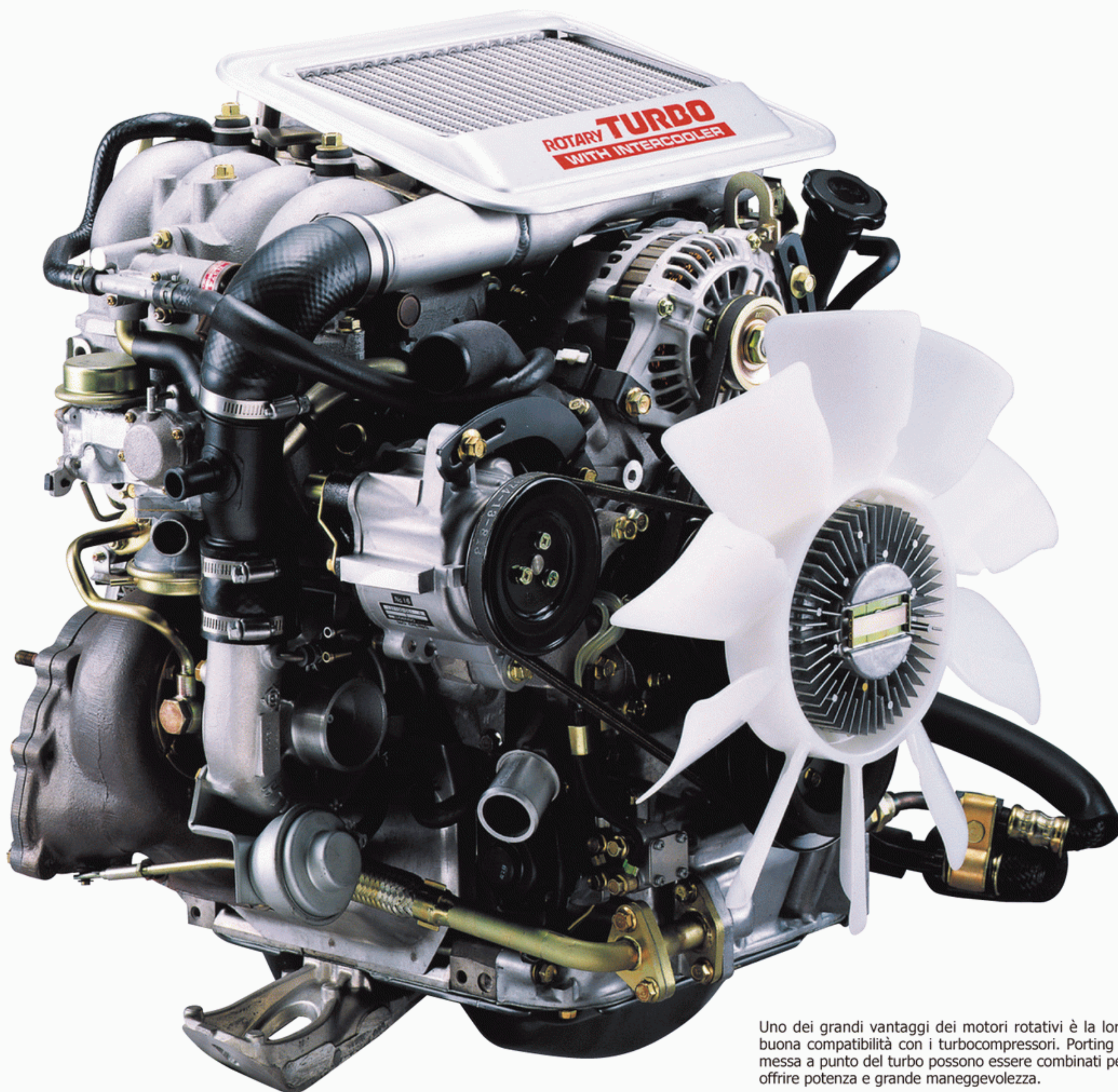
Dispositivi di sovralimentazione

Aumentando le dimensioni del compressore o del turbocompressore, oppure la pressione di compressione, si ottiene lo stesso effetto che si avrebbe aumentando la cilindrata, senza tuttavia dover alterare il motore. I risultati sono ancora migliori se abbinati a una messa a punto meccanica. Questi dispositivi sottopongono il motore a uno sforzo aggiuntivo, pertanto è necessario prendere delle precauzioni. Mentre un rapporto di compressione alto è indispensabile per potenziare un motore normale senza dispositivi di sovralimentazione, la compressione va invece ridotta al minimo con compressori e turbocompressori, per prevenire una combustione di benzina anomala o danni alle parti causati dall'aumentata potenza esplosiva. Quando si mette a punto un motore dotato di turbocompressore, uno degli aspetti chiave sarà contenere il ritardo del turbo, per ottenere una risposta più pronta.

Aumentare le dimensioni della turbina

Questo tipo di messa a punto sostituisce la normale turbina con una più grande, dato che è la dimensione della turbina a limitarne la resa massima. Anche se consente di aumentare notevolmente la potenza, una turbina più grande ha lo svantaggio di rallentare la risposta del motore. A meno di non avere un propulsore di grossa cilindrata, in grado di generare gas di scarico di volume elevato, o un motore abbastanza potente, questa tecnica può portare a una riduzione della coppia a bassi giri ed essere efficace solo agli alti regimi, rendendo così la vettura molto difficile da controllare.

Intercooler

In un motore dotato di turbocompressore, l'intercooler raffredda l'aria riscaldata dalla compressione e migliora l'efficienza volumetrica del motore. Gli intercooler vengono montati anche sulle vetture di serie, ma aumentandone le dimensioni se ne può migliorare il rendimento. Aumentando il tempo di percorrenza dell'aria in sistemi troppo grandi, però, la pressione di compressione tenderà a scendere, con una perdita che, in alcuni casi, potrebbe oscillare fra il 10% e il 20%.

Compressore volumetrico

Il compressore volumetrico funziona in modo simile al turbocompressore: immette aria compressa nel motore, consentendo così di generare una maggiore potenza. Montato su motori aspirati, è in grado di potenziarli in modo piuttosto semplice, esattamente come un turbo. Dato che non provoca ritardi nella risposta dell'acceleratore, risulta particolarmente utile su piste tecniche che richiedono una risposta immediata.

Motori rotativi

Lo scopo principale della messa a punto di un motore rotativo è quello di allargare le luci di aspirazione per immettere una maggiore quantità di miscela aria-benzina nella camera di combustione, con un effetto simile a quello che si otterrebbe montando un albero a camme ad alzata elevata in un motore a movimento alternativo. Il porting periferico, comunemente impiegato in auto da competizione a motore rotativo, incide molto negativamente sulla coppia ai bassi giri, compromettendo la normale guida stradale. Luci di scarico e turbocompressore sono generalmente molto vicini nei motori rotativi, per consentire ai gas di scarico di far girare la turbina in modo efficace. Combinando porting e messa a punto del turbo si può ottenere un notevole miglioramento delle prestazioni.

Uno dei grandi vantaggi dei motori rotativi è la loro buona compatibilità con i turbocompressori. Porting e messa a punto del turbo possono essere combinati per offrire potenza e grande maneggevolezza.

Porting: la chiave per una maggiore potenza nei motori rotativi

Bilanciamento

In confronto ai motori a movimento alternativo, quelli rotativi presentano una struttura semplice e meno componenti. È perciò agevole smontarli e riassemblarli con una precisione maggiore, in modo da ottenere prestazioni più elevate. La parte più importante di questo processo è rappresentata dalle guarnizioni d'angolo del rotore, che corrispondono alle fasce elastiche dei motori alternativi: sistemandole in modo che abbiano tutte la stessa distanza, il rotore si muoverà in modo scorrevole, conservando il giusto livello di compressione. Se le guarnizioni sono montate in modo impreciso, si verificherà una perdita di potenza e, nel peggiore dei casi, perfino il blocco del motore.

Porting laterale

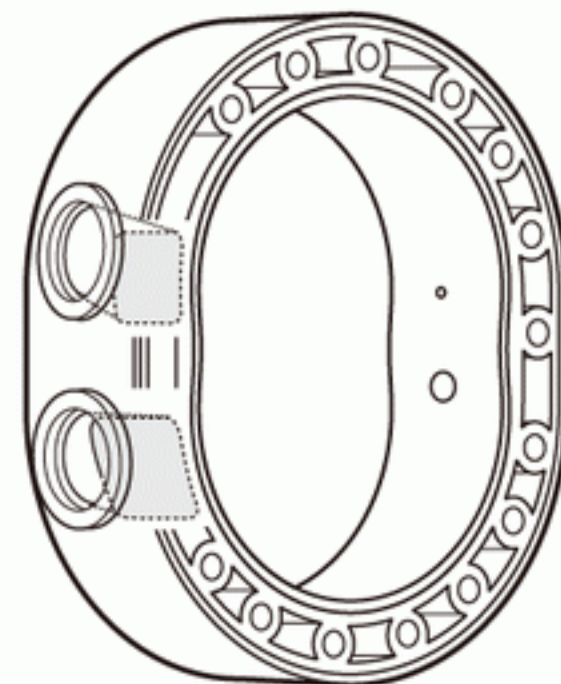
Aumentando il diametro delle luci di aspirazione poste sull'alloggiamento laterale del motore, l'aria può penetrare più velocemente del normale, aumentando il volume totale e offrendo una maggiore potenza. I vantaggi sono simili a quelli che si avrebbero con un albero a camme ad alzata elevata in un motore a movimento alternativo.

Porting a ponte

Si tratta di un metodo per mettere a punto le luci laterali. Viene definito "porting a ponte" perché la sagoma della luce allargata presenta una sezione con un "ponte" centrale.

La creazione di questo ponte fra due aperture, al posto di un'unica luce più grande, è motivata dal fatto che, quando le luci vengono allargate al massimo, il ponte risulta necessario per garantire la tenuta della guarnizione, evitandone la caduta quando passa sopra questa sezione.

Porting periferico

Questo sistema di messa a punto del motore rotativo utilizza speciali resine adesive per otturare le luci di aspirazione poste sull'alloggiamento laterale e spostarle quindi sulla parte superiore dello statore. Il vantaggio di quest'operazione è che la miscela aria-benzina viene immessa direttamente nello statore, aumentando la potenza agli alti regimi. Purtroppo, questo non permette di mantenere la coppia ai regimi inferiori, a causa dell'impossibilità di regolare la miscela aria-benzina a seconda del numero di giri. Ne risulta un motore con prestazioni massime superiori ai regimi alti, ma con pochissima coppia a quelli minimi, che procede un po' a strappi e non è facile da controllare.

Porting combinato

Una tecnica che combina porting laterale (o porting a ponte) e porting periferico. Trae vantaggio da entrambi i tipi di modifica, utilizzando un sistema sequenziale che usa solo le luci laterali ai bassi regimi e quelle periferiche solo a quelli alti.

Elaborazione della trasmissione

La trasmissione trasforma la potenza del motore in velocità. Deve essere il più possibile efficiente nel trasmettere la potenza al fondo stradale e abbastanza robusta da poter gestire l'erogazione.

Ottenere la prestazione migliore dal proprio motore

Rapporto finale

La modifica del rapporto finale permette di privilegiare la velocità di punta o l'accelerazione. Per esempio, un motore con regimi elevati, grande potenza in uscita e un forte divario di prestazioni fra regimi bassi e alti, può diventare più guidabile riducendo il rapporto finale. Questo consente anche di andare a migliorare notevolmente l'accelerazione dell'auto.

Rapporto finale alto

Questa messa a punto serve ad aumentare la velocità di punta della vettura, migliorando anche l'andatura ai bassi regimi e portando vantaggi significativi in termini di consumi. Tuttavia, l'intervallo necessario per raggiungere la banda di coppia/potenza ideale rende l'accelerazione un po' pigra. In uscita dalle curve strette, potrebbe essere difficile raggiungere la potenza e la coppia desiderate e non sarà sempre facile ottenere livelli di accelerazione sufficienti.

Rapporto finale basso

Con un rapporto finale basso, il motore riesce a sostenere regimi elevati con marce alte come la terza e la quarta. La velocità di punta potrebbe risentirne, ma sarà più facile guadagnare potenza e coppia e aumentare i livelli di accelerazione, consentendo di prendere rapidamente velocità in uscita di curva. I rapporti di riduzione bassi sono particolarmente adatti a piste tecniche con curve strette. L'unico svantaggio è rappresentato dalla possibilità che la rapida risposta all'acceleratore spinga il motore fuori giri.

Rapporto finale alto (Rapporto finale basso)

1ª marcia 2ª marcia 3ª marcia 4ª marcia 5ª marcia 6ª marcia

9000 7500 6000 4500 3000 1500 Motore G/min

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

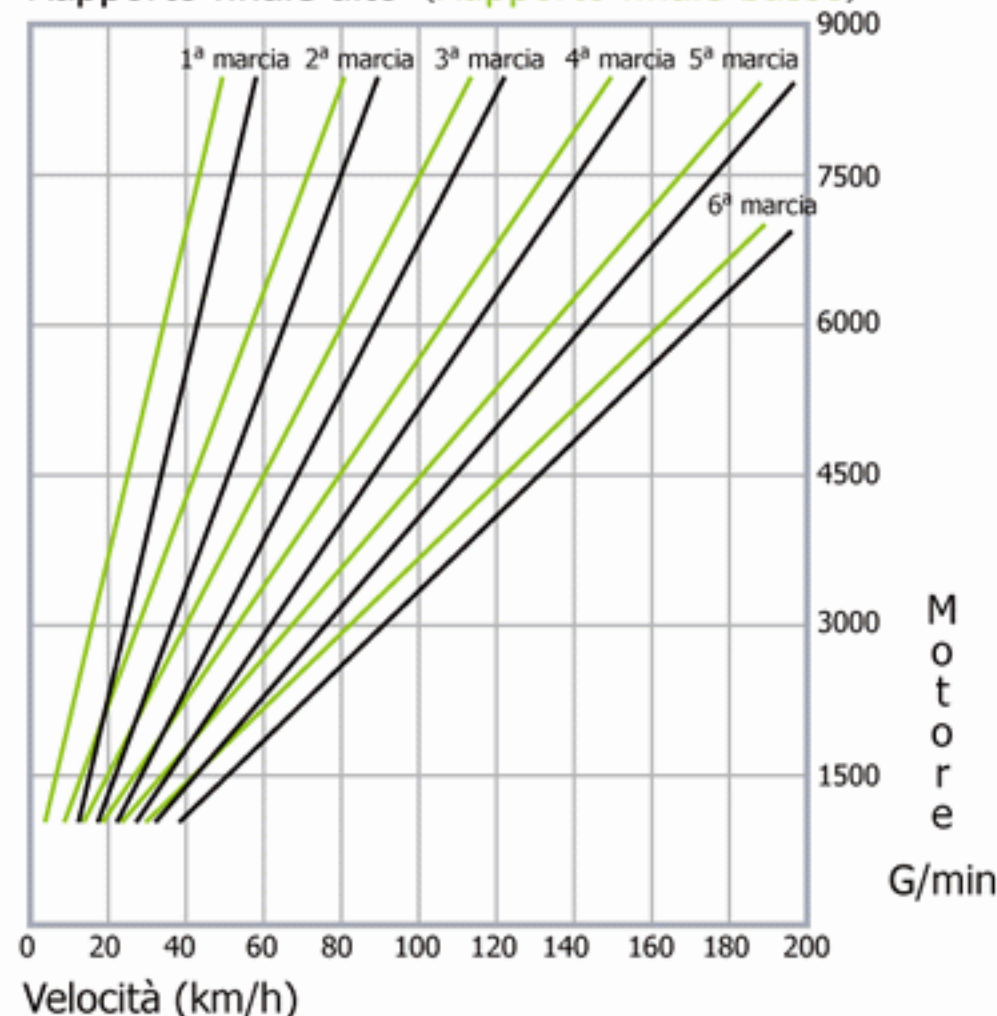
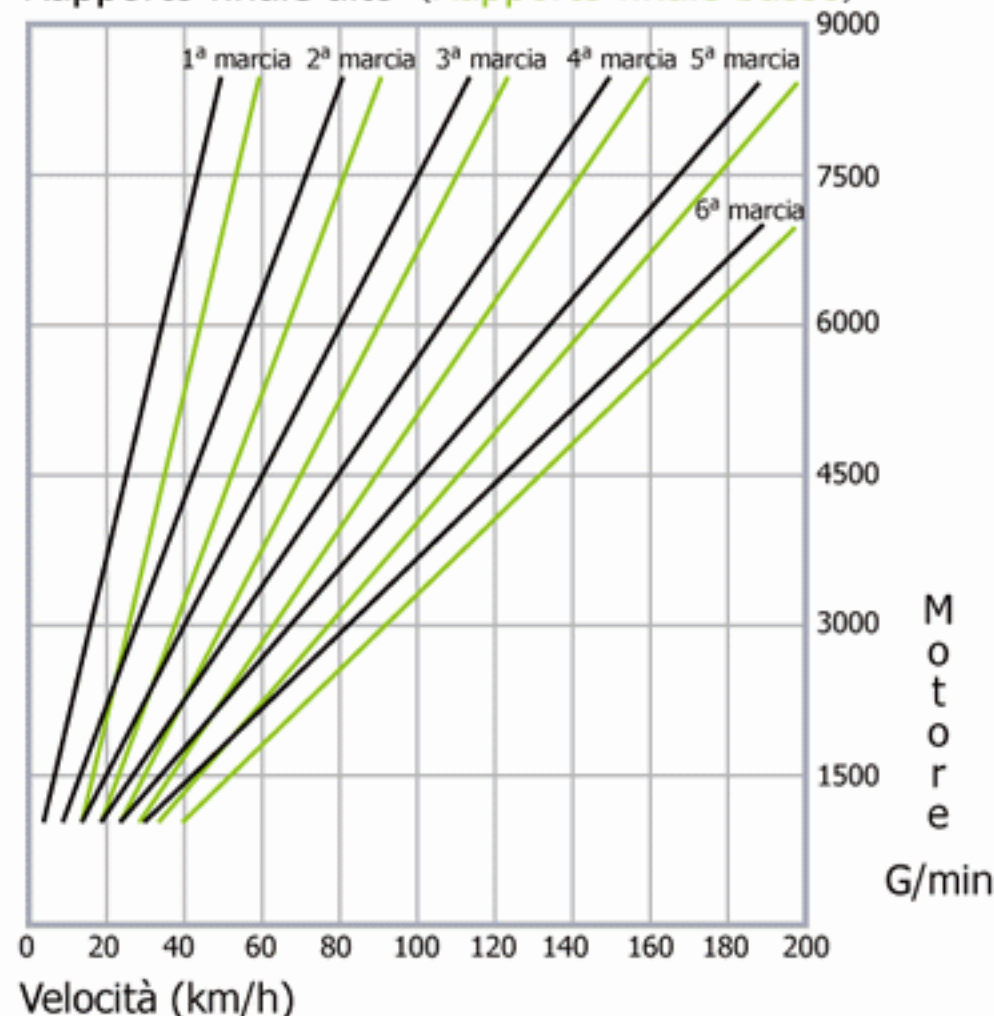
Velocità (km/h)

Rapporto finale alto (Rapporto finale basso)

1ª marcia 2ª marcia 3ª marcia 4ª marcia 5ª marcia 6ª marcia

9000 7500 6000 4500 3000 1500 Motore G/min

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

Velocità (km/h)

Rapporto del cambio

La messa a punto del cambio solitamente si riflette in un avvicinamento dei rapporti, per ottenere i cosiddetti "rapporti corti". Ciò rende più agevole restare nella banda di potenza e migliora in modo notevole le prestazioni in accelerazione. A seconda del rapporto finale, tuttavia, il motore potrebbe salire troppo di giri e richiedere cambi di marcia più frequenti.

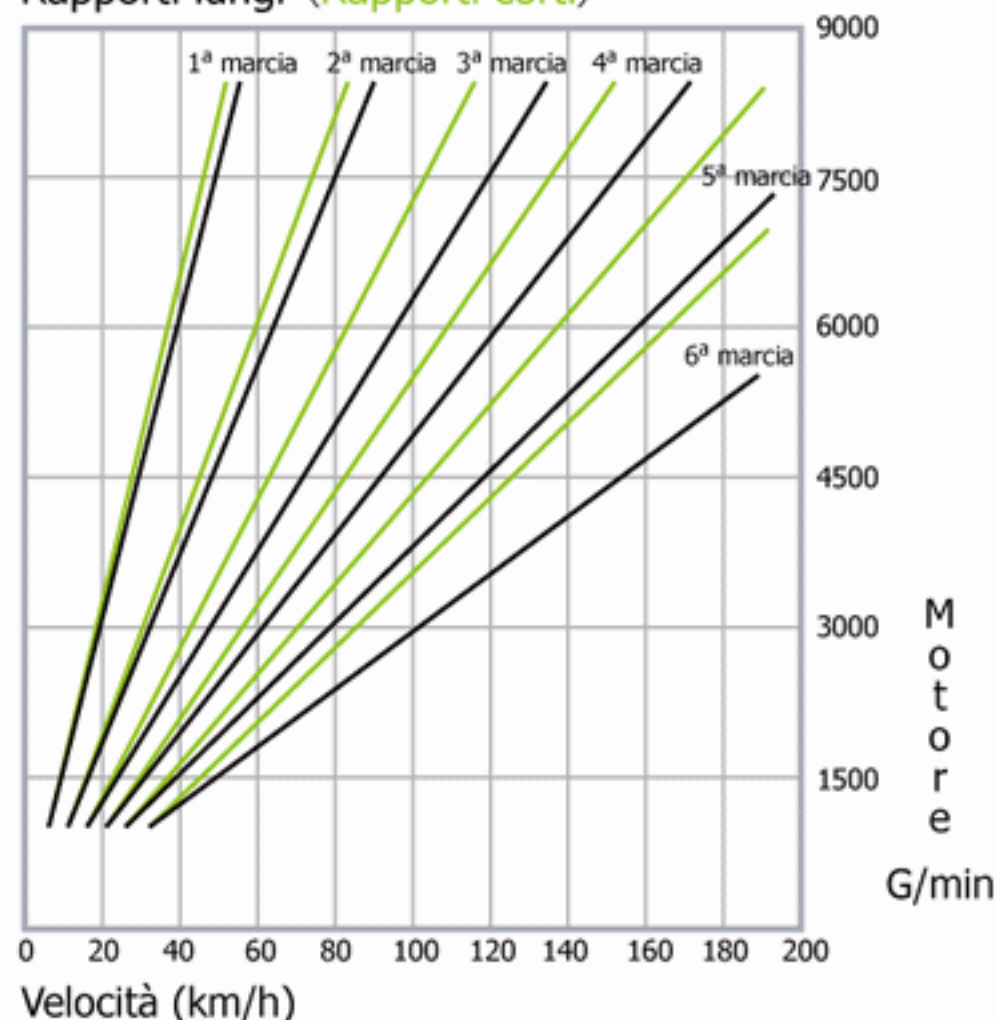
Rapporti corti

In un cambio manuale con rapporti corti, la differenza di dimensione fra gli ingranaggi è relativamente ridotta. Più corto è il rapporto, minore sarà la perdita di giri quando si ingrana una marcia superiore, consentendo un uso più efficiente della potenza motore. Questo tipo di assetto è particolarmente adatto ai motori aspirati, con banda di potenza ridotta per l'impiego di un albero a camme ad alzata elevata o di altre elaborazioni. La regolazione avviene solitamente in funzione del tipo di tracciato e si affianca alla selezione del rapporto finale.

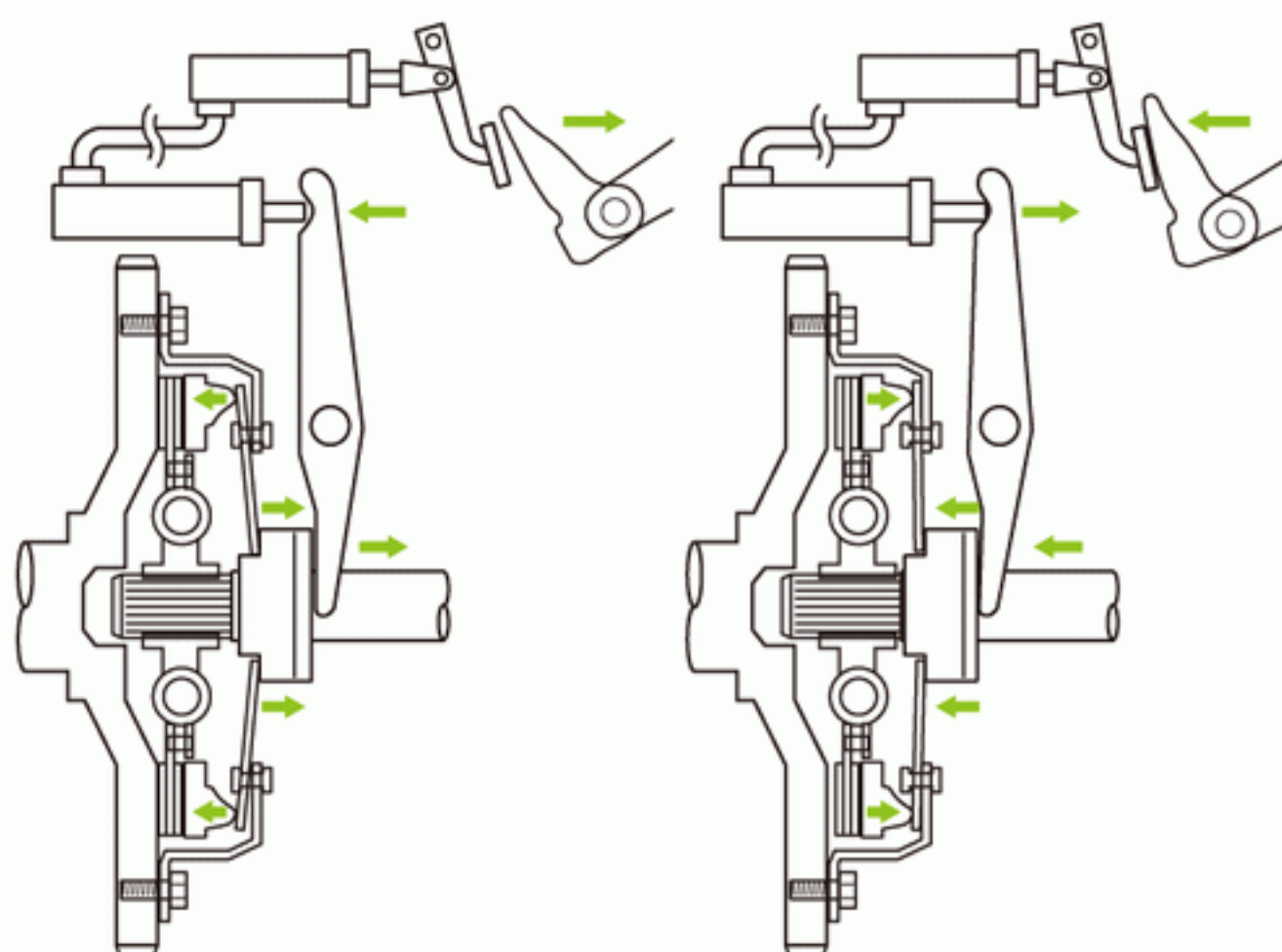
Rapporti lunghi

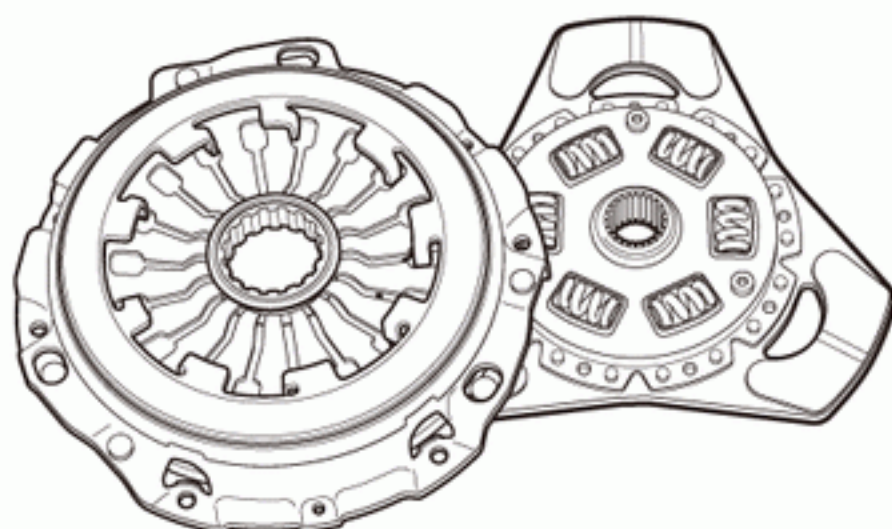
Molte vetture di serie sono impostate per la massima efficienza dei consumi e cercano di mantenere regimi di rotazione bassi. La differenza di dimensione fra gli ingranaggi è perciò relativamente ampia, riducendo la potenza erogata al momento del cambio e sacrificando l'accelerazione. In generale, i cambi attuali tendono comunque a combinare rapporti lunghi e rapporti corti, senza mantenerli costanti fra le marce, in modo da sfruttare al meglio le peculiarità del motore e affrontare percorsi di vario tipo. Per esempio, un rapporto corto verrà usato tra la prima e la seconda marcia, per facilitare partenza e accelerazione, mentre uno lungo sarà preferito a partire dalla terza.

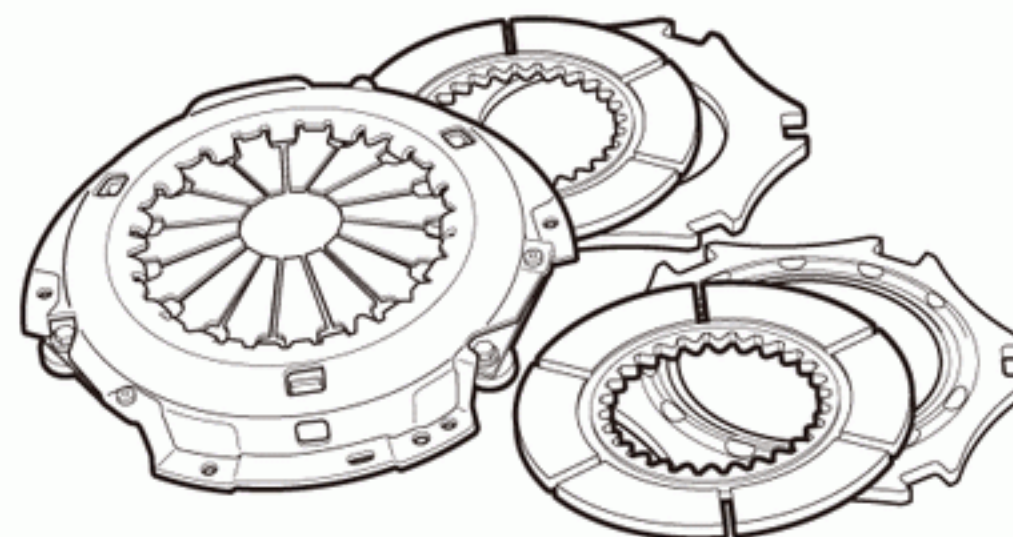
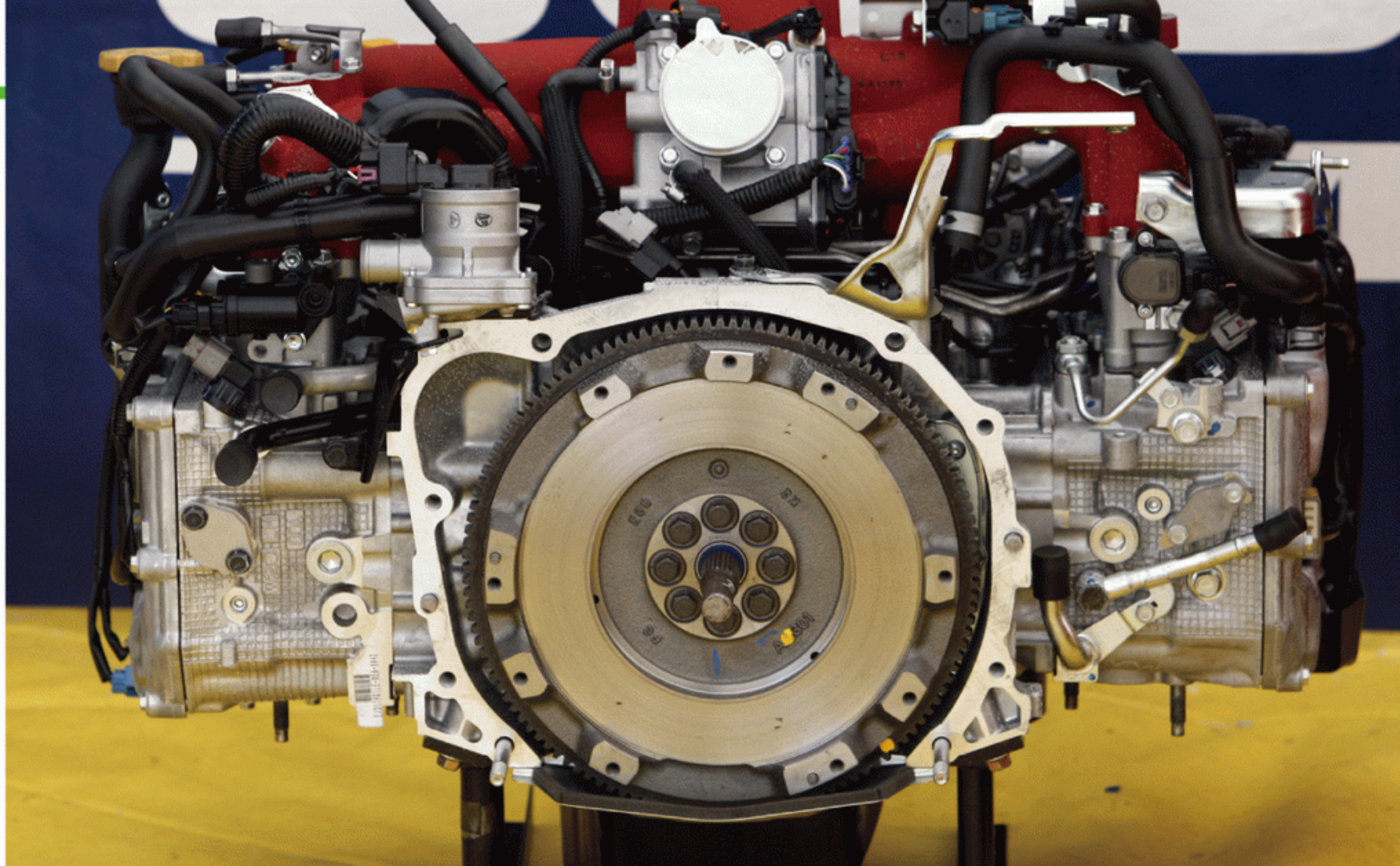
Rapporti corti (Rapporti lunghi)
1ª marcia 2ª marcia 3ª marcia 4ª marcia 5ª marcia 6ª marcia
Motore G/min
Velocità (km/h)

Rapporti lungi (Rapporti corti)
1ª marcia 2ª marcia 3ª marcia 4ª marcia 5ª marcia 6ª marcia
Motore G/min
Velocità (km/h)

Limitare la perdita di potenza e migliorare la risposta

Frizione

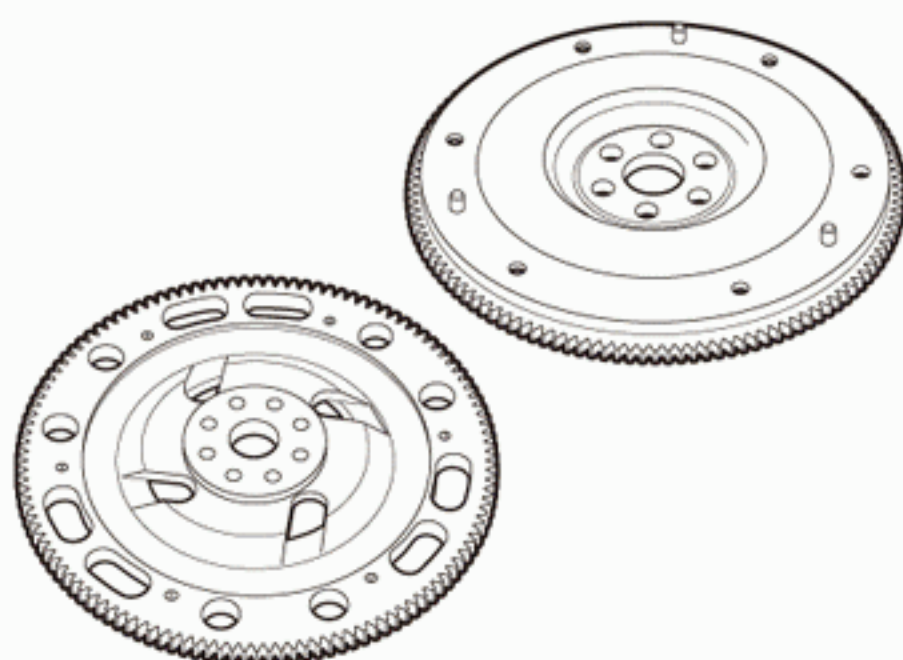
Sulle vetture elaborate è essenziale montare una frizione rinforzata, in modo da poter trasmettere la maggiore potenza al cambio con perdite minime e senza problemi durante le cambiate. Anche una quantità infinitesimale di slittamento andrà a ridurre l'accelerazione. Occorre pertanto aumentare l'attrito fra disco della frizione e ferodo in proporzione all'aumento di potenza e coppia del motore.

Disco e ferodo

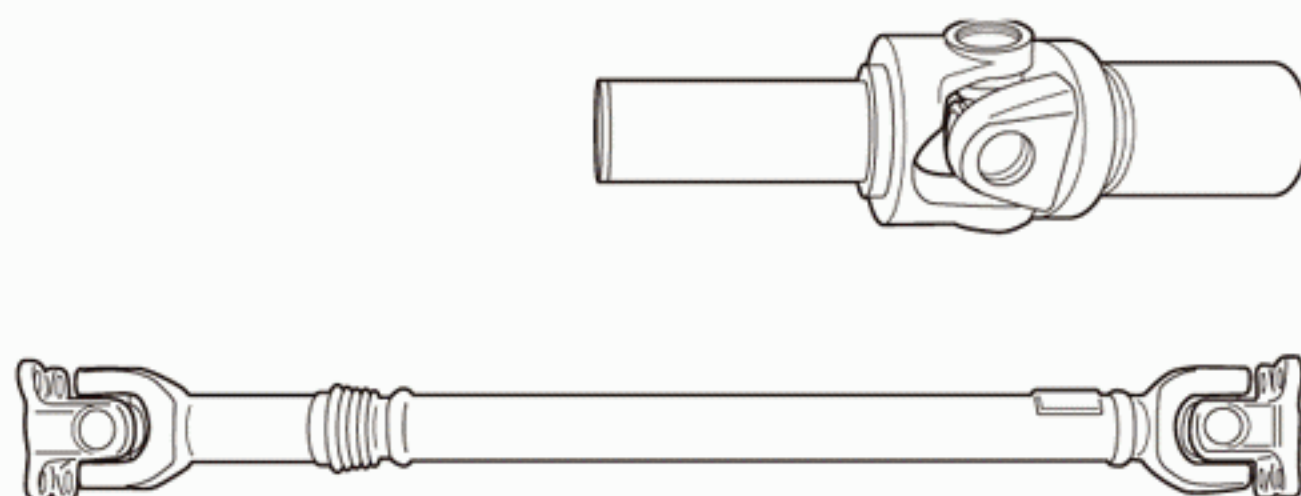
Il più comune metodo di rafforzamento della frizione consiste nel sostituire disco e ferodo con equivalenti più resistenti. Aumentando il coefficiente di attrito tra queste due parti, la potenza del motore passa alla trasmissione in modo più stabile. Ciò è fondamentale in presenza di un motore elaborato per erogare più potenza, perché non provoca ritardo nella risposta in situazioni, come le gare, in cui si lavora molto di frizione. Sono comunemente utilizzati dischi di metallo, per via del loro attrito e della maggiore resistenza all'usura.

Frizione multidisco

Le normali frizioni utilizzano un solo disco, ma la presenza di più dischi migliora le prestazioni, in quanto consente di estendere l'area di attrito. Le frizioni rafforzate offrono una maggiore pressione e sono in grado di trasmettere al meglio la potenza del motore, di solito utilizzando due o quattro dischi. La frizione aumenta di pari passo con il numero di dischi, per cui occorre decidere quanti utilizzarne valutando il livello di potenza a cui è stato portato il propulsore. Le frizioni multidisco, pur migliorando risposta e durata, presentano comunque degli effetti negativi: richiedono più forza per disimpegnarsi, cosa che rende il pedale della frizione molto pesante, e una maggiore precisione nell'uso.

Volano e albero primario

Alleggerire la trasmissione può essere un modo efficace per migliorare la prontezza nell'accelerazione e l'elasticità. Un volano estremamente leggero può tuttavia impedire alla vettura di raggiungere livelli di coppia ottimali, in particolare quando si guida in salita, perciò sarà necessario prendere precauzioni aggiuntive.

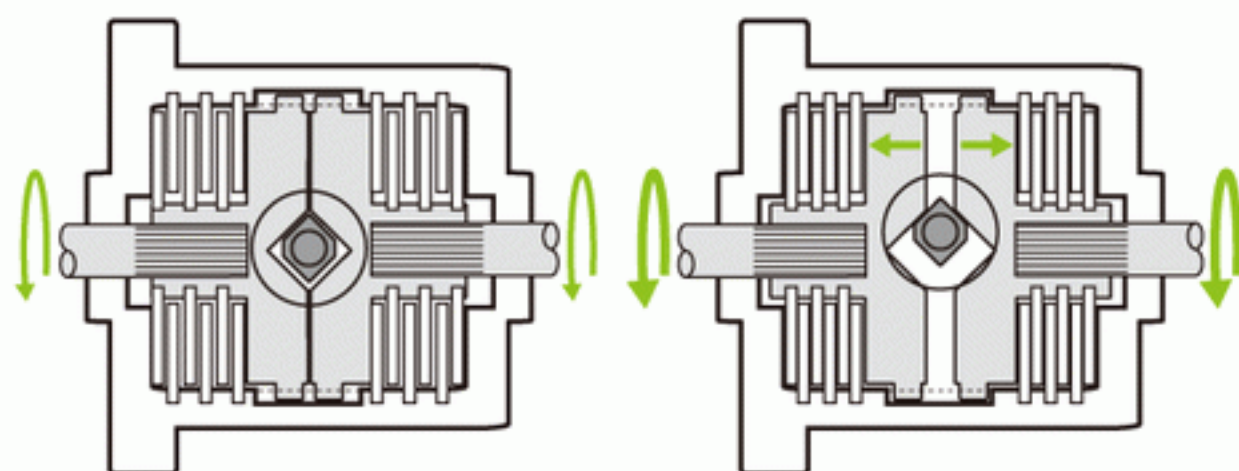
Volano leggero

Il volano è collegato all'estremità dell'albero motore appena prima della frizione e ha come compito principale la prevenzione delle irregolarità nella rotazione del motore. Più pesante è, più aumenta la fluidità del funzionamento del propulsore, cosa che va però a scapito della velocità. Per questo spesso conviene montare un volano più leggero, migliorando la risposta del motore in fase di accelerazione, anche se la ripresa risulta meno fluida e con coppia leggermente inferiore.

Albero primario leggero

L'albero primario (noto anche con il nome di albero del cambio) trasmette la potenza dalla scatola del cambio al differenziale. Sostituendolo con versioni più leggere, solitamente in carbonio o fibra di vetro, è possibile dimezzare il peso, migliorando risposta del motore e accelerazione. A parte l'ovvio vantaggio della riduzione del peso, quest'operazione consente di incrementare la fluidità di rotazione del sistema.

Trasmettere potenza al fondo stradale in modo affidabile

Differenziale autobloccante

Il differenziale autobloccante (LSD) è essenziale per una trasmissione della potenza affidabile dal motore al fondo stradale e per la sterzata ad alte velocità. È disponibile in diversi tipi e il più efficace nel limitare la differenza nella velocità di rotazione delle ruote motrici è quello meccanico a frizione multidisco, che consente una grande libertà nell'impostare il limite della differenza di rotazione tra le ruote. La trazione migliore viene così offerta in base alla configurazione della trasmissione, al tipo di auto o di stile di guida, alla conformazione della pista e a una serie di altri fattori. Lo svantaggio di questa libertà di scelta è che l'elevato carico delle parti richiede frequenti operazioni di cambio d'olio e manutenzione.

I differenziali autobloccanti meccanici consentono una grande libertà nell'impostare il limite della differenza di rotazione tra le ruote, ma sono elementi specializzati per gli sport motoristici e, come tali, non vengono solitamente montati di serie.

Fattore di blocco

Il fattore di blocco descrive il punto in cui il differenziale autobloccante limita la differenza di rotazione tra due ruote. Con un differenziale normale (aperto), il fattore di blocco è pari allo 0% (le ruote possono girare indipendentemente l'una dall'altra), mentre con un valore pari al 100% si verifica il blocco totale (le ruote devono sempre girare alla stessa velocità). Più elevata è la percentuale, maggiore è il limite alla differenza di rotazione possibile. Non sempre un fattore di blocco elevato è migliore: questo valore dev'essere calcolato attentamente basandosi sullo schema della trasmissione, l'altezza del veicolo e la larghezza della sua carreggiata, oltre che sulle caratteristiche di guida che si desiderano ottenere. Un fattore di blocco troppo elevato incrementa il sottosterzo, riducendo le prestazioni in curva. In generale, un valore prossimo al 50% fornisce la maggiore facilità di controllo, mantenendo comunque efficace il sistema LSD. L'unico modo per trovare l'impostazione perfetta rimane comunque quello di procedere per tentativi.

Coppia iniziale

La coppia iniziale rappresenta la spinta che agisce sui dischi situati all'interno del differenziale. Modificandola, cambierà anche il tempo necessario ad attivare il differenziale autobloccante: più è alta, migliore è la risposta di accelerazione e più velocemente questo si attiva, e viceversa. La messa a punto del differenziale autobloccante può tuttavia compromettere la sterzata e, nel caso di vetture FF, influire sulla direzionalità durante le fasi di accelerazione. Negli ultimi tempi sono diventati più comuni differenziali autobloccanti con impostazioni di bassa coppia iniziale e un alto fattore di blocco.

Tipi di differenziale autobloccante meccanico

A 1 VIA

Questo tipo di differenziale autobloccante funziona solo in accelerazione, permettendo alla ruota interna di girare liberamente quando si avvicina una curva, proprio come con un differenziale aperto. È particolarmente adatto alle vetture FF, che sono soggette a sottosterzo, ma può portare a un livello di tenuta marcatamente diverso a seconda che l'acceleratore sia premuto o meno.

A 2 VIE

Questo tipo di LSD funziona a prescindere dalla pressione dell'acceleratore. Pur provocando un significativo sottosterzo iniziale, offre una maggiore stabilità in frenata, consentendo di affrontare le curve al limite. Vanta inoltre un'ottima risposta e permette al pilota di curvare in modo deciso anche in fase di accelerazione.

A 1,5 VIE

Questo tipo combina le caratteristiche dei precedenti: funziona normalmente in accelerazione, ma riduce l'effetto in frenata per permettere una svolta più agevole in inserimento di curva. È una soluzione universale che non presenta i problemi degli altri differenziali autobloccanti.

Modificare la carrozzeria

Una carrozzeria leggera e rigida è essenziale per l'accelerazione e il controllo nelle corse automobilistiche. Non importa quanto si modifichi il motore: se la carrozzeria è troppo pesante o flessibile, l'aumentata potenza non si tradurrà in velocità.

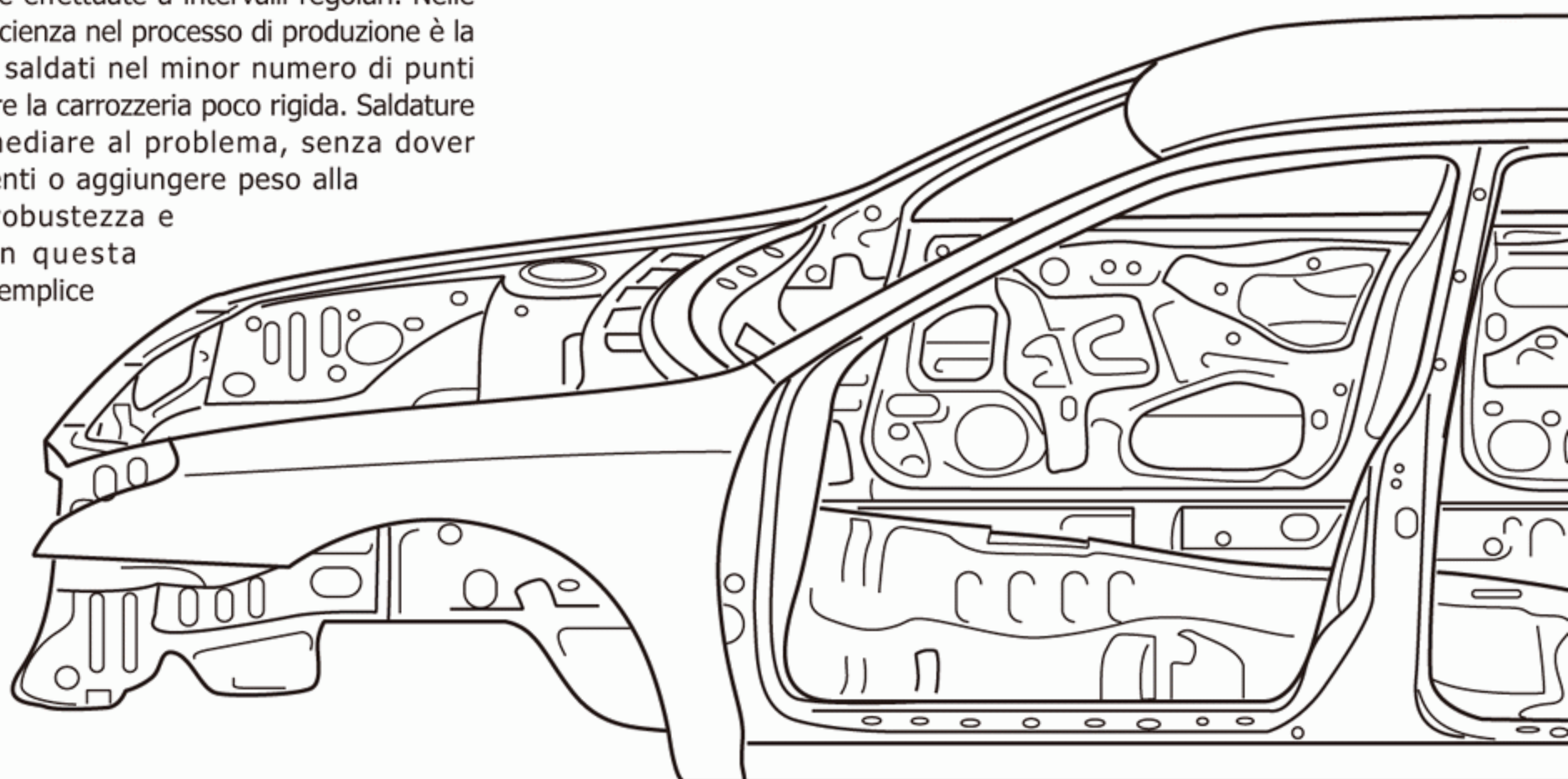
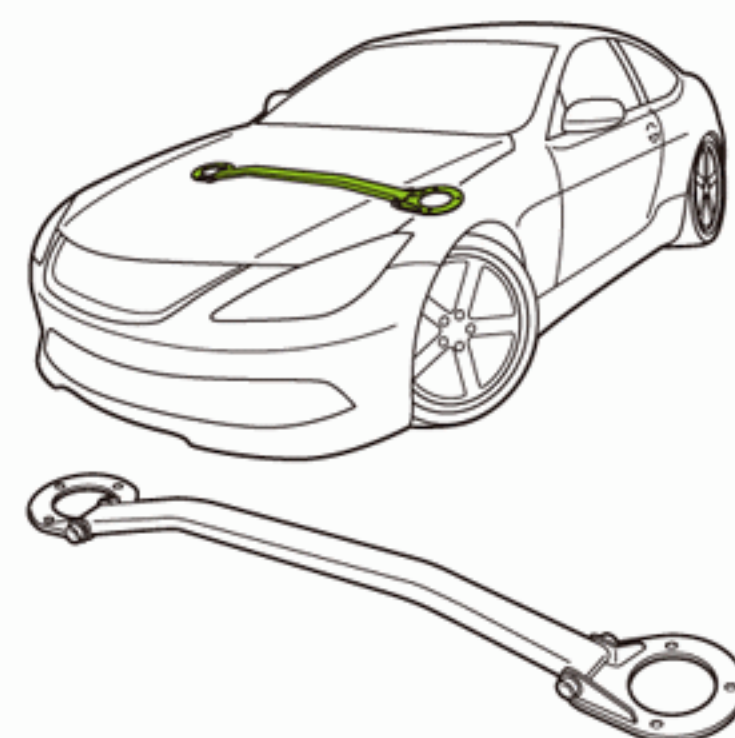
Riduzione del peso e rigidità

Quando si cerca di aumentare velocità e agilità della propria vettura, riduzione del peso e rafforzamento della carrozzeria giocano una parte cruciale. Alleggerendo l'auto si migliorano potenza di accelerazione, frenata e sterzata. Una maggiore rigidezza permette invece alle sospensioni di gestire il movimento di carico, anche nelle situazioni più estreme, e alle ruote di mantenere il contatto con la pista. Affinché il pilota possa prevedere i movimenti della propria auto anche quando spinge al massimo, controllandola con precisione, è essenziale che la carrozzeria sia rigida e non si deformi. Su tracciati come il Nürburgring, dove il coefficiente di trazione (μ) è estremamente basso, l'elevata forza G che agisce lateralmente e verticalmente renderebbe impossibile gareggiare senza una carrozzeria sufficientemente rigida.

Saldatura a punti

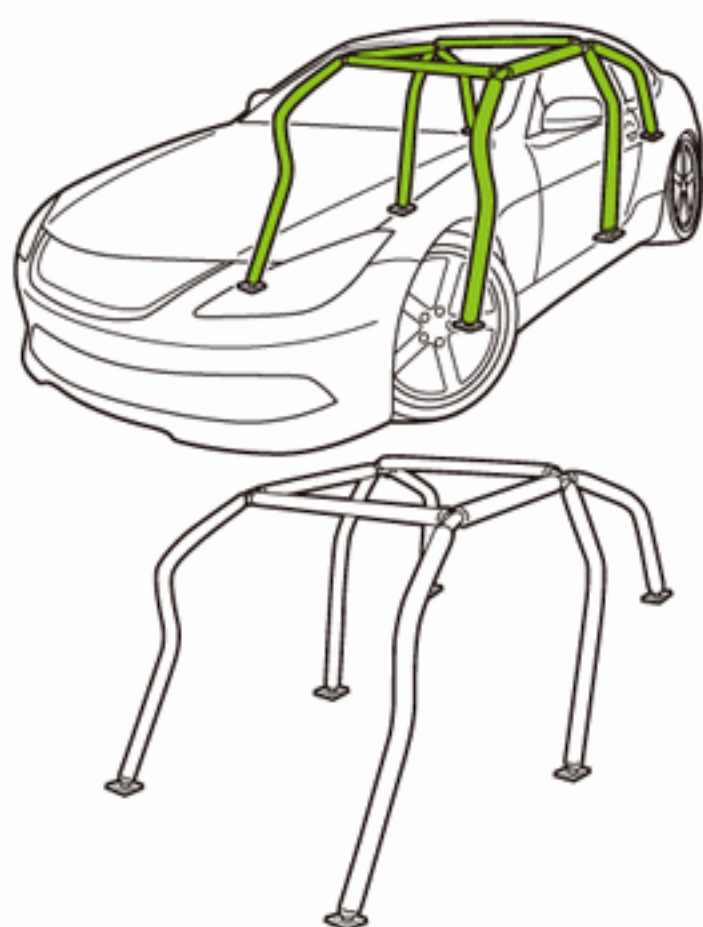
La carrozzeria è costituita da pannelli di metallo compressi e tenuti insieme da saldature effettuate a intervalli regolari. Nelle vetture di serie, in cui l'efficienza nel processo di produzione è la priorità, i pannelli sono saldati nel minor numero di punti possibile, il che può rendere la carrozzeria poco rigida. Saldature aggiuntive possono rimediare al problema, senza dover acquistare altri componenti o aggiungere peso alla vettura. L'aumento di robustezza e rigidità ottenibile con questa soluzione relativamente semplice è davvero notevole.

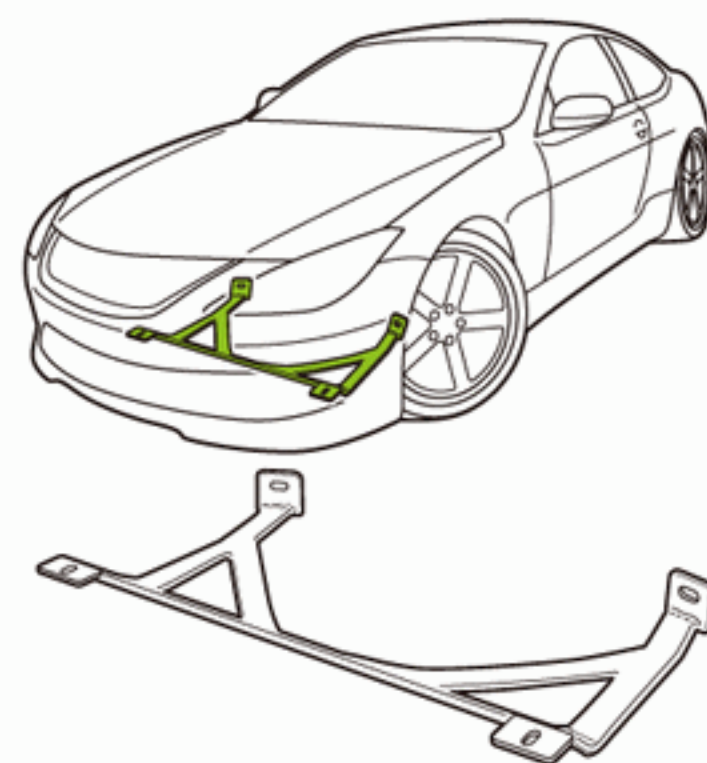
Barra duomi

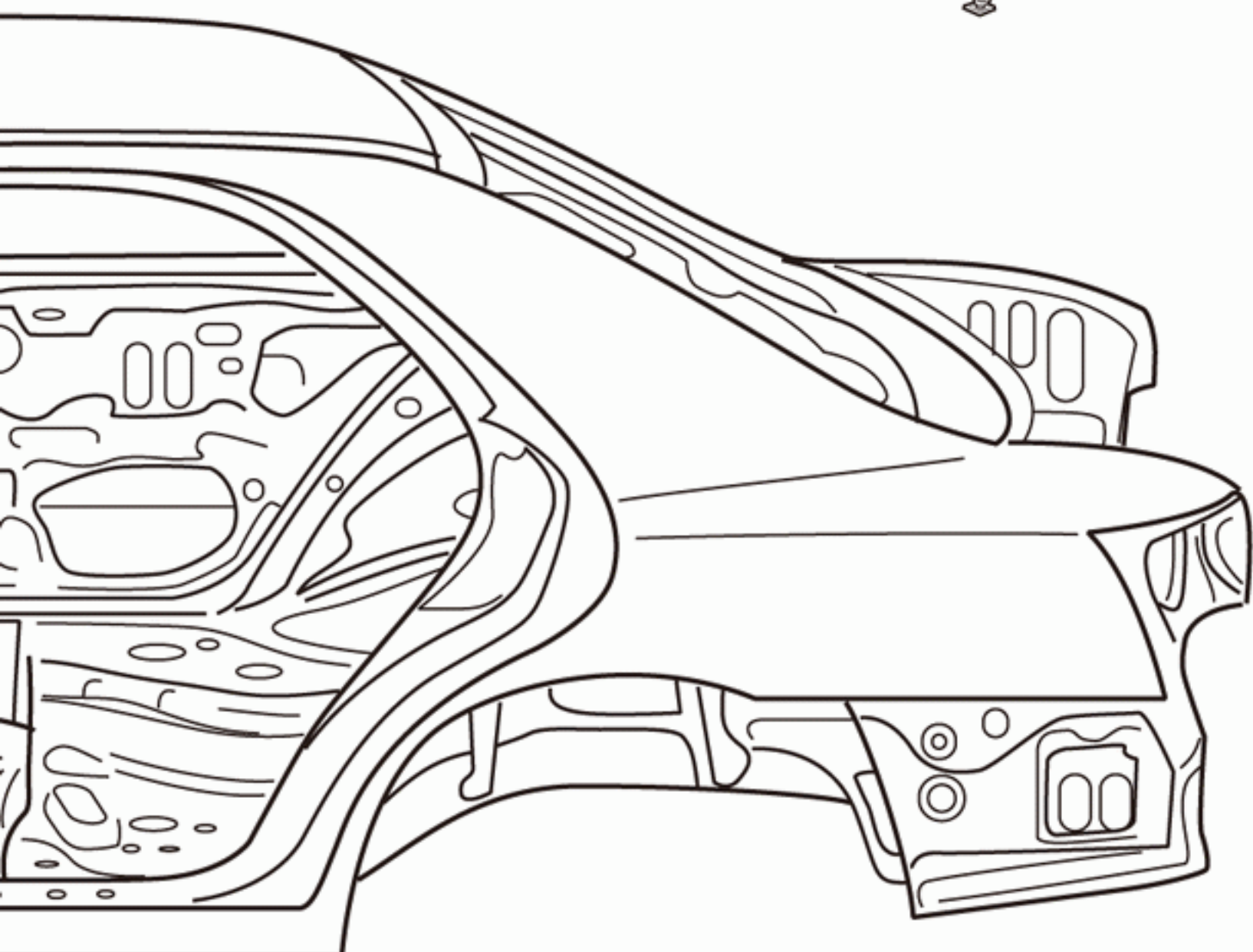
Questa barra collega i punti di aggancio delle sospensioni anteriori (sopra gli alloggiamenti delle ruote) sui lati sinistro e destro della carrozzeria, aumentando la rigidezza dell'avantreno e la precisione del movimento delle sospensioni, per una risposta più immediata nella sterzata. Si utilizza generalmente insieme a miglioramenti di molle, ammortizzatori e boccole. Viene montata quasi sempre sull'anteriore, ma sarebbe buona norma aggiungerne un'altra dietro, per bilanciare al meglio la rigidità.

eria

Tenuta più precisa

Roll cage

Progettate per proteggere i passeggeri in caso di incidenti, le roll cage si prestano anche ad aumentare la rigidezza della carrozzeria. Per ottenere questo risultato, però, vanno saldate direttamente al tetto e ai montanti di supporto, senza alcuno spazio fra roll cage e tetto. La roll cage dovrebbe avere una serie di bracci collegati a vari punti di supporto, per riuscire a fornire un incremento di rigidità significativo.

Barra anti-torsione

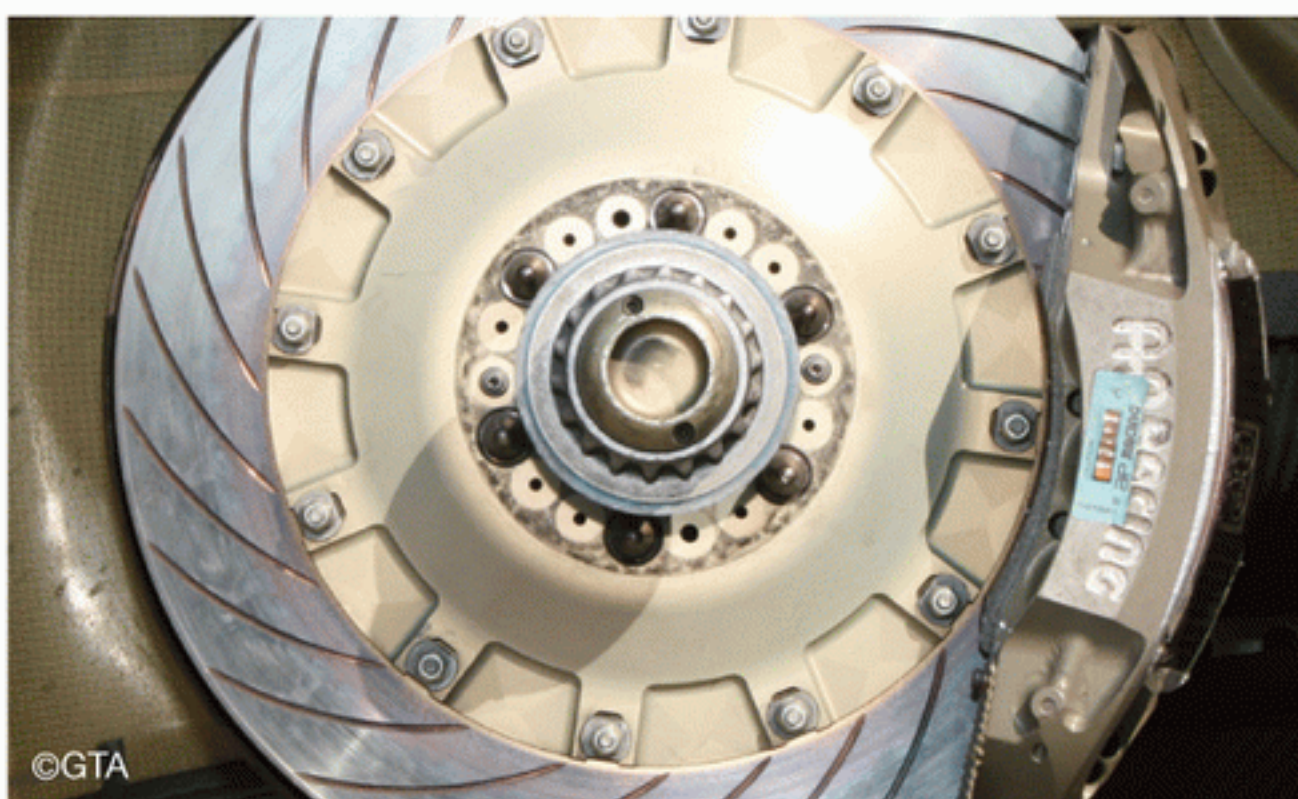
La barra anti-torsione è una barra metallica resistente alla flessione e alla rotazione, che aumenta la rigidezza del pianale e, allo stesso tempo, collega le sospensioni alla sottoscocca, limitando movimenti indesiderati e ottimizzando le prestazioni delle sospensioni. Così, come la barra duomi supporta sospensioni e telaio all'interno del cofano, la barra antitorsione sostiene l'auto sotto la carrozzeria. Insieme alla barra duomi, migliora ulteriormente la stabilità di tenuta.

Ridurre il peso

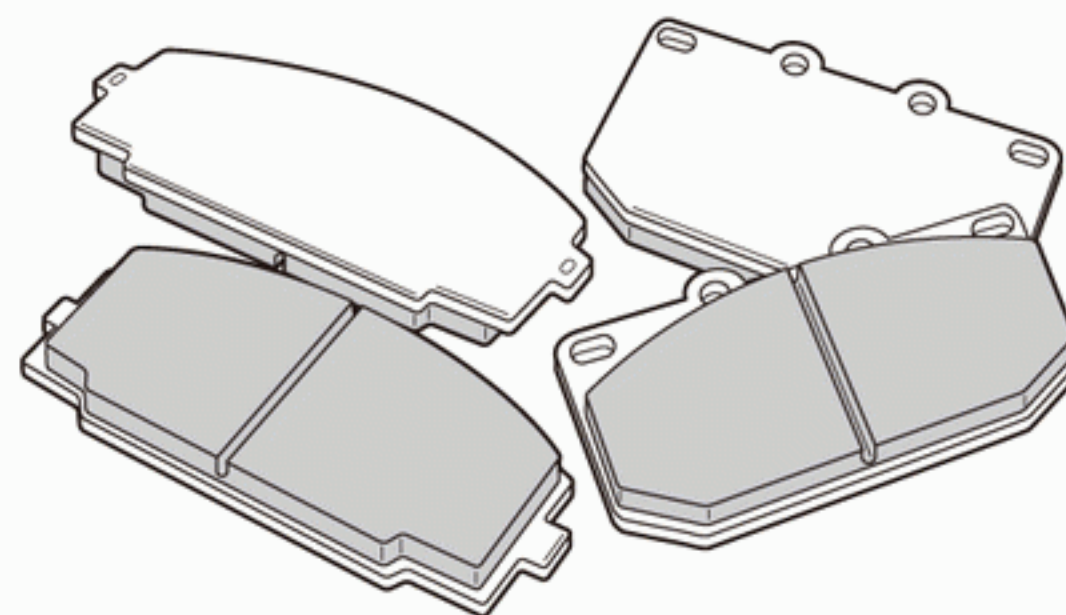
Il modo più efficace per migliorare accelerazione, frenata e tenuta in curva di un'auto è quello di ridurne il peso. Le modifiche possono variare da operazioni base, come la rimozione del sistema di climatizzazione e del materiale insonorizzante, ad altre più drastiche, come la sostituzione di alcuni pannelli della carrozzeria con altri più leggeri in alluminio o fibra di carbonio. Nei casi più estremi, si può adottare un'intera carrozzeria in fibra di carbonio con telaio in alluminio. Per conservare la stabilità e la manovrabilità, però, è necessario anche incrementare la rigidità. Per mantenere un baricentro basso, è consigliabile iniziare il procedimento di alleggerimento dalla parte superiore della vettura.

Migliorare la forza d'arresto

L'aumento della potenza del motore deve essere abbinato a una maggiore forza frenante, ma freni potenti generano anche una notevole quantità di calore che sarà necessario smaltire.

Aumentare la forza d'arresto evitando il fading

Un motore elaborato per offrire una maggiore velocità di punta richiede un impianto frenante in grado di durare più a lungo e di far fronte al fading. Si va da migliorie di base, come la sostituzione delle pastiglie, ad altre più estreme, come la sostituzione dell'intero impianto frenante con versioni progettate per le corse. Bisogna però considerare che gli impianti frenanti da gara non sono necessariamente i migliori in tutte le condizioni, per cui è importante considerare sempre quelle che sono le proprie necessità. Inoltre, pastiglie e pinze più grandi potrebbero tuttavia aumentare la massa sospesa dell'auto, con effetti negativi per la tenuta. In generale, la forza frenante dovrebbe sempre essere superiore alla potenza del motore, ma è meglio non esagerare, in quanto un sistema frenante troppo efficace montato su un'auto leggera finirà per comprometterne la guidabilità.

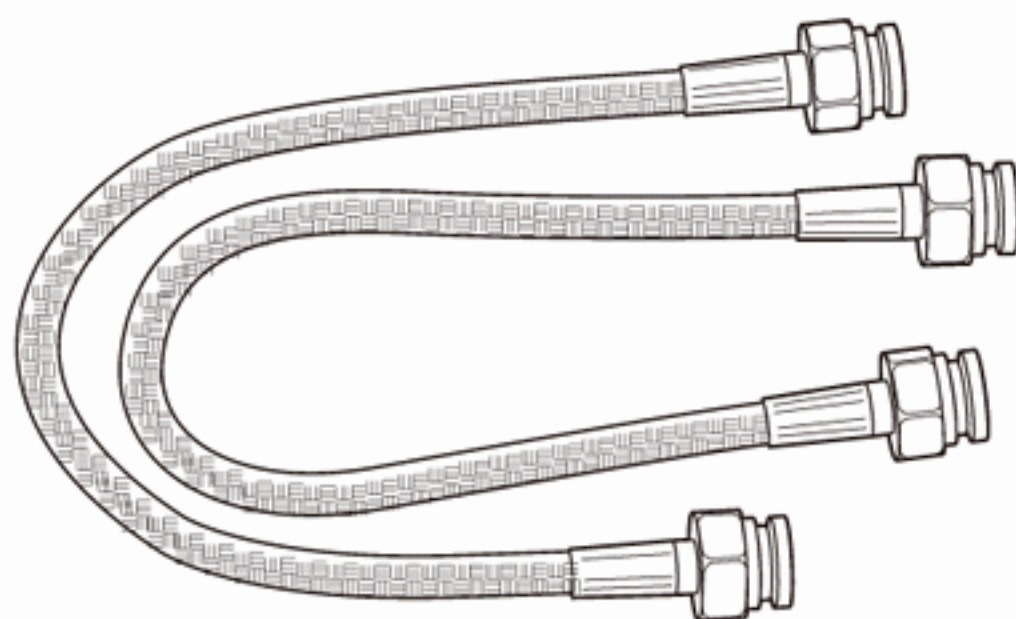
©GTA

Pastiglie

Gli elementi più importanti nella messa a punto dell'impianto frenante sono le pastiglie, da cui dipende la forza frenante e la resistenza al surriscaldamento. Ce ne sono di diversi tipi, da quelle progettate per la strada a quelle professionali per sport motoristici, ciascuna con una diversa temperatura ottimale di utilizzo e un diverso grado di resistenza al calore. Scegliere delle pastiglie sbagliate potrebbe non produrre i risultati desiderati, arrivando addirittura a peggiorare la guidabilità dell'auto. Le pastiglie più performanti si consumano inoltre rapidamente e aumentano il consumo dei dischi, per via della maggiore frizione. È importante sostituire tutte le pastiglie contemporaneamente, in modo da assicurare una frenata uniforme.

Liquido freni

Si tratta del liquido utilizzato negli impianti frenanti di tipo idraulico. Le sue specifiche sono indicate dalle diciture DOT: più il suo valore è elevato, più alti saranno il punto di ebollizione e la capacità di assorbimento dell'umidità. Il liquido freni adatto agli sport motoristici (DOT 5) ha un punto di ebollizione superiore ai 200, in modo da evitare il vapor lock, e un'elevata capacità di assorbimento dell'umidità, che però lo rende facilmente deteriorabile e costringe a procedere spesso alla sua sostituzione. Va notato che un alto valore DOT non corrisponde necessariamente a una maggiore efficacia frenante.

Migliorare l'impianto frenante

Tubi dei freni

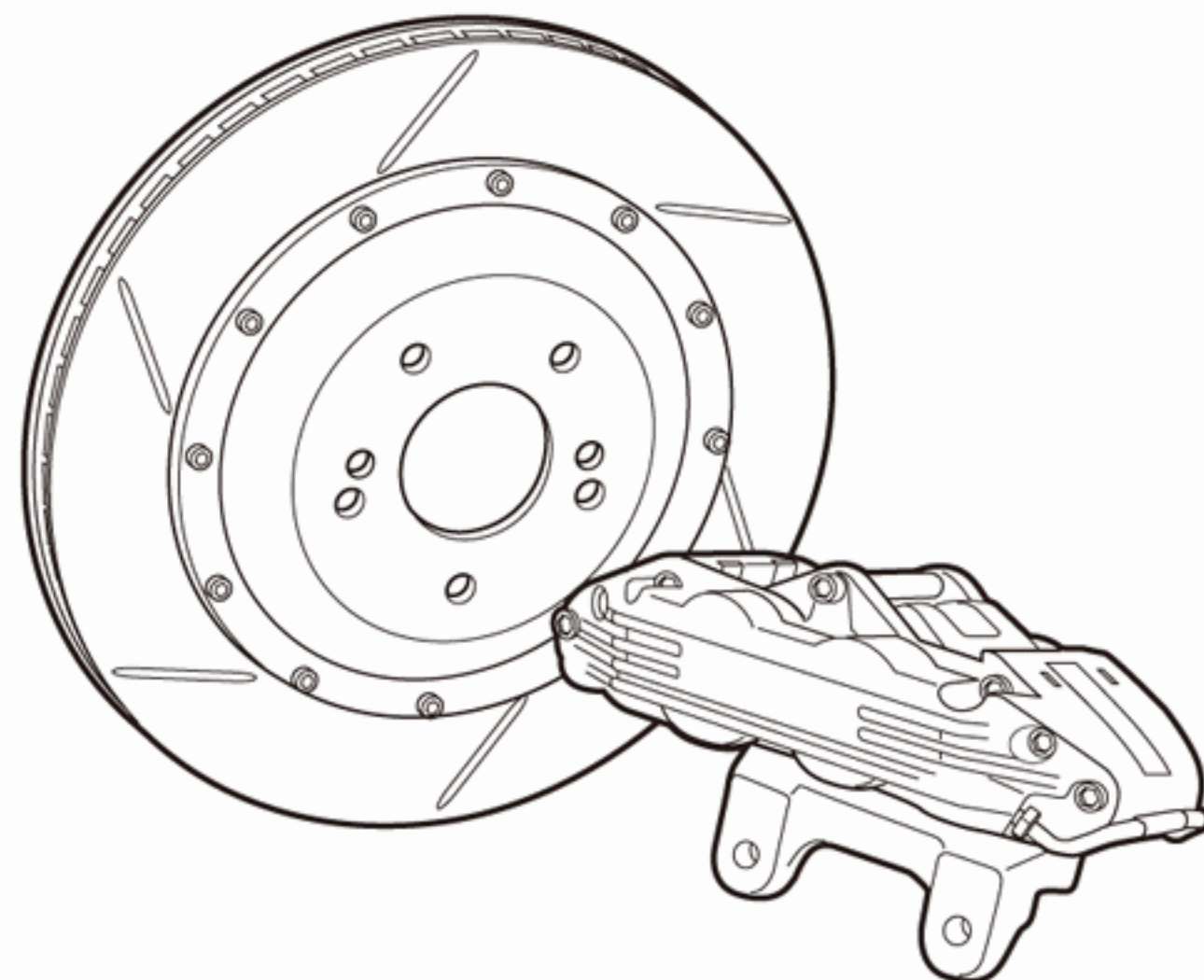
I tubi dei freni sono i condotti in cui scorre il liquido freni. Il tipo più comune, in gomma, può subire rigonfiamenti in caso di frenate intense e ripetute, perdendo così prontezza nella risposta. Per questo motivo le auto sportive usano tubi in teflon ricoperti di maglia d'acciaio inossidabile, che offrono la stessa flessibilità della gomma, ma una maggiore resistenza al rigonfiamento. Le vetture da corsa utilizzano solo questi tubi, per fare in modo che i freni rispondano sempre ai comandi del pilota.

Dischi

Il modo più efficace per aumentare la capacità di frenata è di montare dei dischi maggiorati, in grado di offrire maggiore attrito. Poiché i normali dischi in ghisa andrebbero ad aumentare le masse sospese, peggiorando la manovrabilità dell'auto, stanno iniziando a diffondersi dischi leggeri in ceramica o in fibra di carbonio. A causa del logorio a cui vengono sottoposti, devono essere regolarmente sostituiti o ricondizionati per conservare la forza frenante.

Pinze

Potenziare le pinze dei freni spesso significa dover rivedere completamente l'impianto frenante. Le normali pinze spingono le pastiglie contro i dischi da un lato, mentre le più costose pinze a pistoncini opposti le spingono da entrambi i lati. Alcune vetture di serie montano freni con sei pistoncini, in grado di esercitare una pressione più uniforme sulla pastiglia e di aumentare pertanto la forza frenante. Le pinze con pistoncini opposti sono realizzate in un unico pezzo e l'elevata rigidità delle stesse garantisce una frenata stabile anche in condizioni d'utilizzo estreme.

SOSPENSIONI

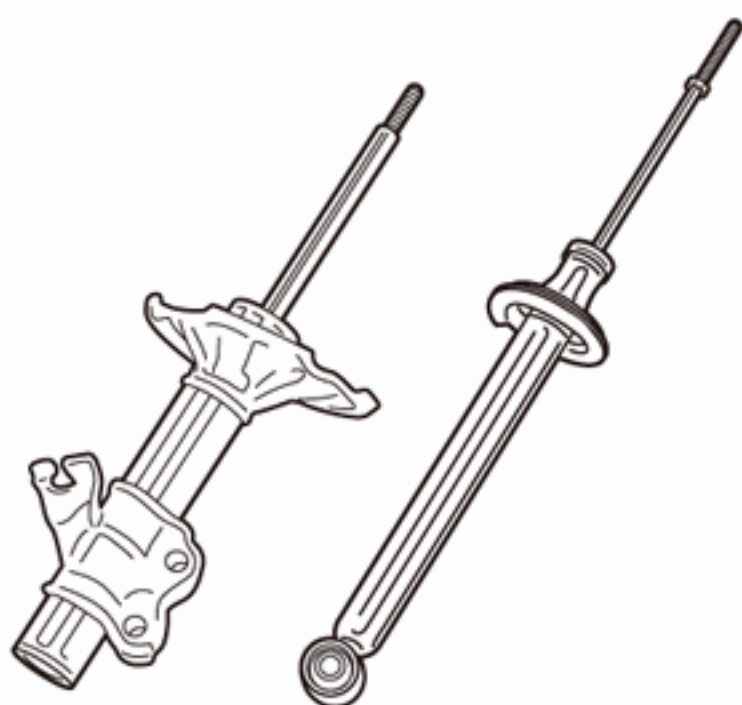
CAPITOLO 03 Elaborazione e impostazioni

Migliorare le sospensioni

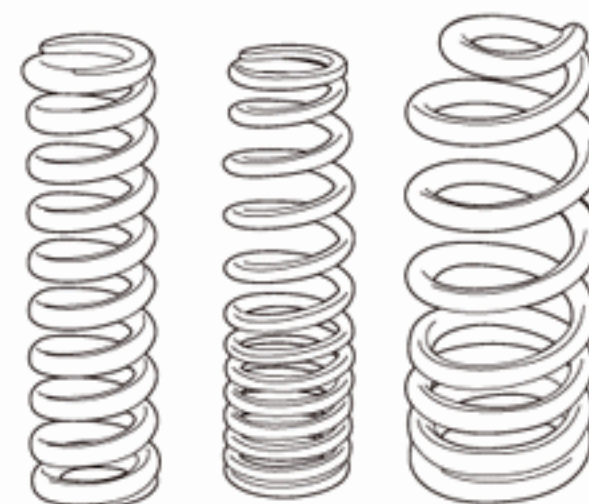
In condizioni di guida estrema, è fondamentale avere buone sospensioni per mantenere stabilità e maneggevolezza. La messa a punto delle sospensioni può trasformare completamente il comportamento di una vettura.

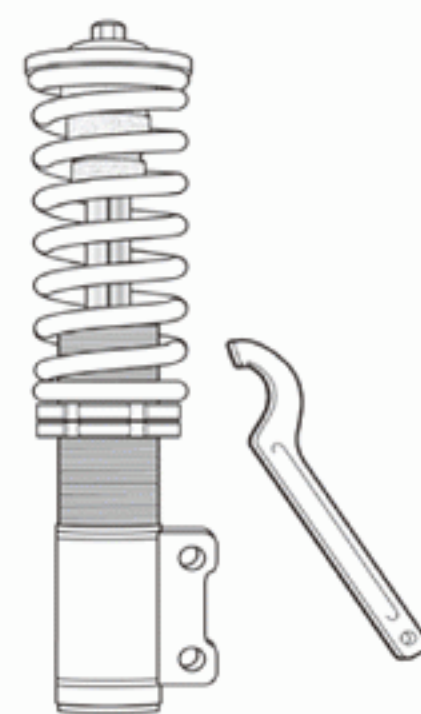
Regolare le caratteristiche di tenuta

La messa a punto delle sospensioni per la guida sportiva sacrifica parte della comodità a vantaggio della velocità. Fintanto che l'auto si trova su una superficie piatta, come quella di un circuito, più vicina al suolo è la carrozzeria, e quindi il baricentro, più stabile è la guida. Sospensioni più dure riducono le oscillazioni in accelerazione, frenata e svolta, migliorando notevolmente la tenuta. Se sono troppo rigide, tuttavia, la vettura non riesce a far fronte alle variazioni di carico e la guidabilità cala. La soluzione migliore è irrigidire le sospensioni, tenendo però presente il livello di spostamento dei pesi, che dev'essere assicurato in tutte e quattro le direzioni. Inoltre, a seconda della vettura e del fondo stradale, a volte è necessario ammorbidire le sospensioni per ottenere una maggiore aderenza.

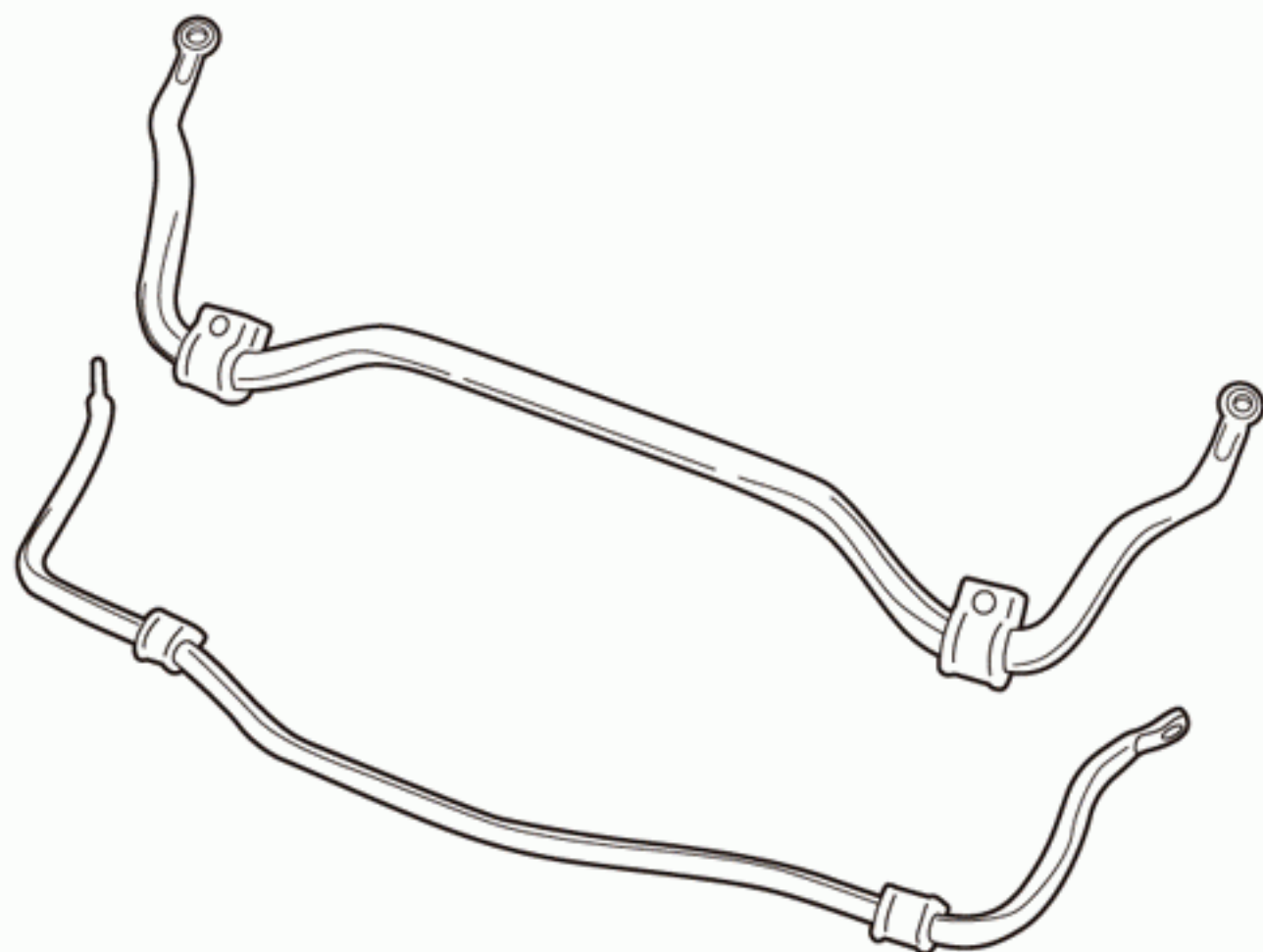
Ammortizzatori

Gli ammortizzatori vengono rimpiazzati per ottenere una forza di smorzamento superiore a quella offerta dagli ammortizzatori standard, focalizzati sul comfort di guida. Con quest'operazione è possibile mantenere la stabilità anche ad alta velocità o con carico elevato, con un maggior livello di controllo. La sostituzione e la messa a punto degli ammortizzatori dovrebbe essere eseguita contemporaneamente a quella delle molle.

Molle

Le molle migliorano la tenuta, aiutando a mantenere basso il baricentro e compensando il rollio in sterzata, l'abbassamento del muso in frenata e l'abbassamento della vettura in partenza e accelerazione.

Sospensioni ad altezza regolabile

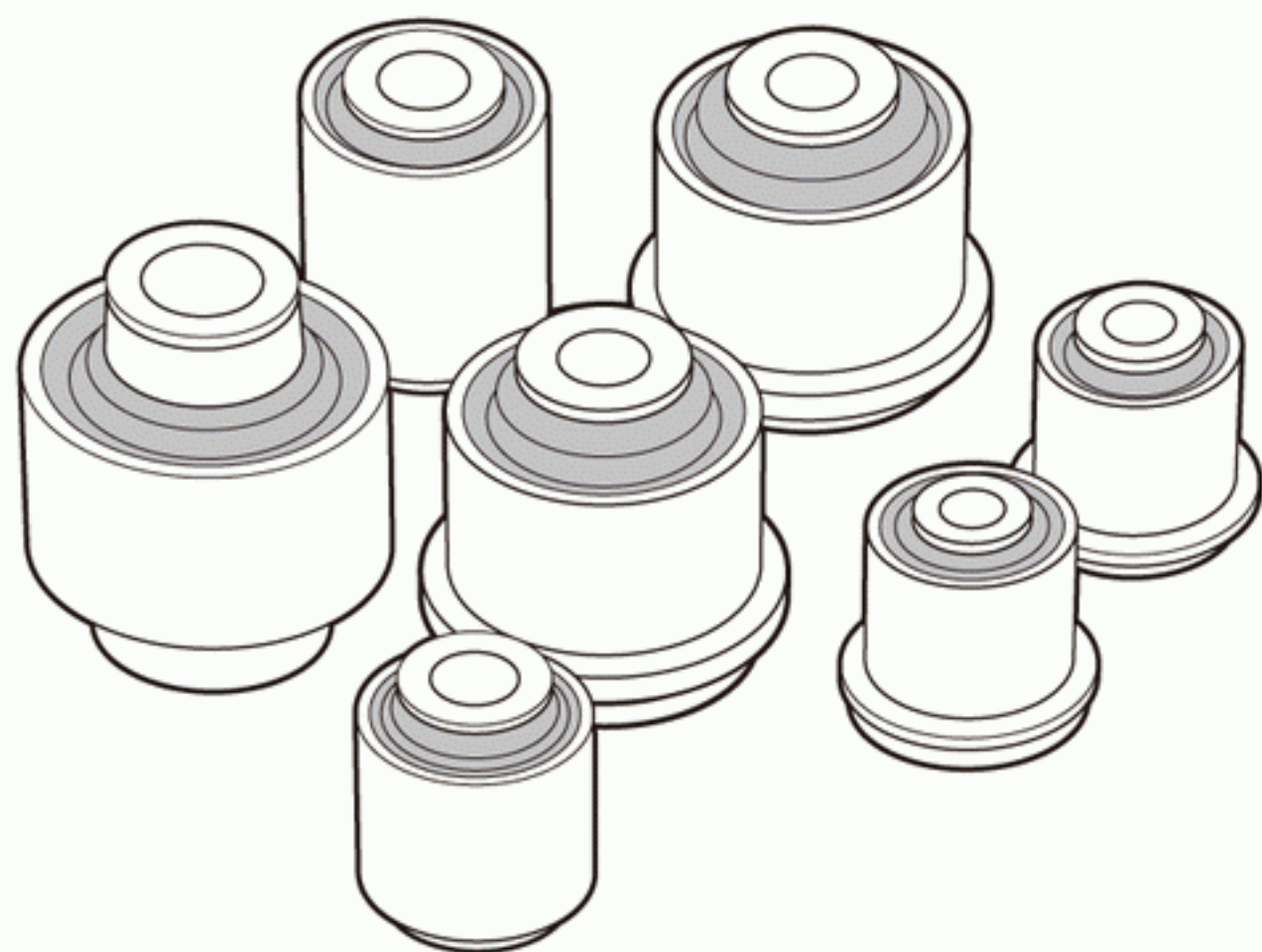
La tipologia principale di sospensioni ad altezza regolabile permette di regolare l'altezza dell'assetto mediante ammortizzatori che consentono di aumentare o diminuire la lunghezza delle molle e di regolare lo smorzamento, così da adattarsi a qualsiasi situazione. Tra i diversi modi di regolare l'assetto figurano viti regolabili, guarnizioni e l'uso di staffe.

Ottenere il livello di tenuta desiderato

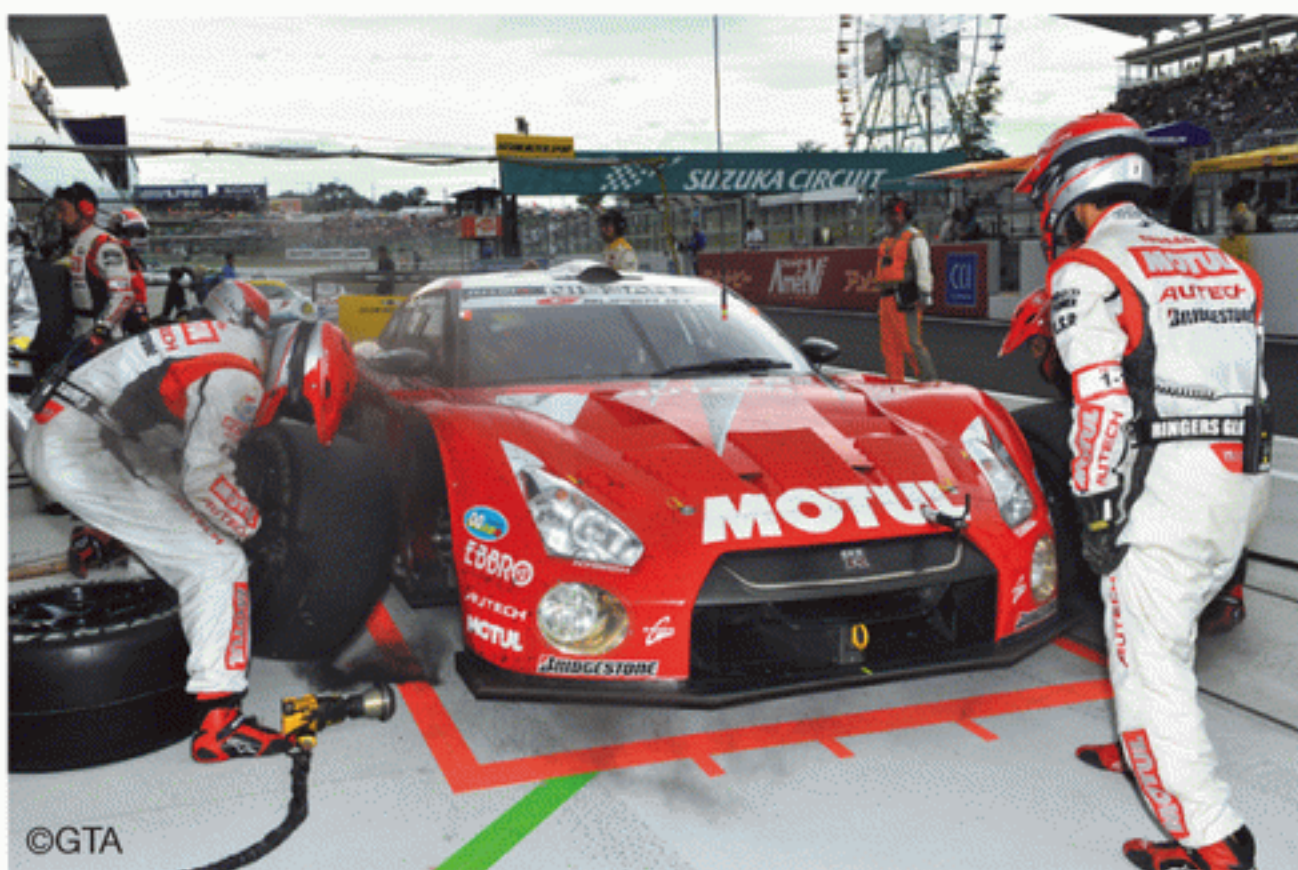
Barre stabilizzatrici

Irrigidire le barre stabilizzatrici aiuta a ridurre il rollio in sterzata. Lavorando su quella anteriore aumenta il sottosterzo, mentre su quella posteriore aumenta il sovrasterzo.

Boccole

Le boccole offrono assorbimento nelle aree in cui gli ammortizzatori e altri elementi delle sospensioni sono collegati alla carrozzeria. Sono generalmente fatte di materiali resinosi, come la gomma o il poliuretano, ma ne esistono anche alcune che utilizzano cuscinetti a sfera nelle parti mobili. Utilizzando boccole più resistenti si possono eliminare eventuali oscillazioni del sistema di sospensioni, migliorando la tenuta lineare e la risposta nella sterzata.

PNEUMATICI

CAPITOLO 03 Elaborazione e impostazioni

Montare pneumatici a prestazioni elevate

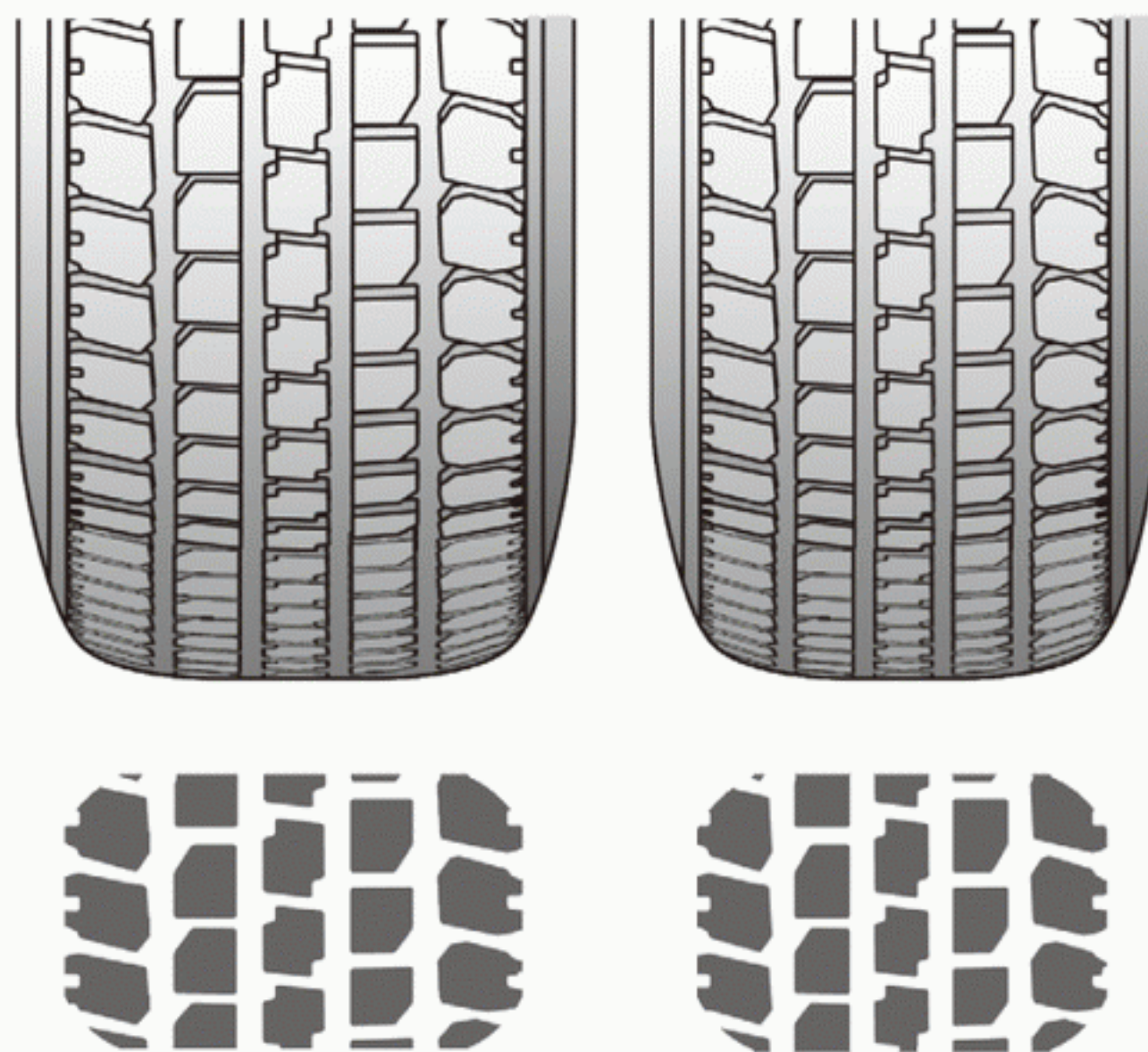
Gli pneumatici ad alte prestazioni sono un'arma a doppio taglio perché, pur migliorando sensibilmente l'aderenza, rendono più difficoltoso il controllo se spinti al limite. La scelta degli pneumatici deve essere fatta con molta attenzione, considerando come si integreranno con potenza e caratteristiche della vettura.

©GTA

Larghezza

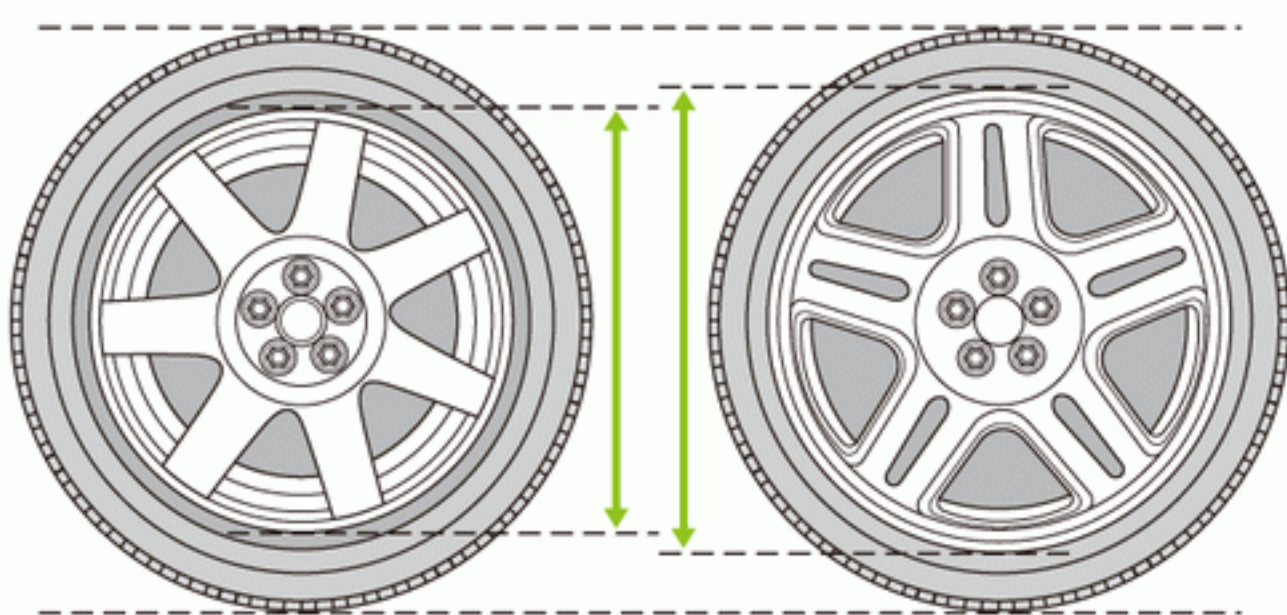
Aumentando la larghezza degli pneumatici, aumenta la superficie a contatto con il terreno e, di conseguenza, migliora l'aderenza. Tuttavia, l'aderenza è influenzata anche dal carico presente sullo pneumatico e montare pneumatici ampi su un'auto leggera potrebbe non portare miglioramenti sensibili a livello di aderenza. Un altro problema sorge quando pneumatici di grandi dimensioni sono montati su un'auto con scarsa potenza, perché la maggiore aderenza finisce per andare a discapito della velocità. Per questi motivi, occorre scegliere la misura degli pneumatici considerando sempre il peso e la potenza del veicolo.

Aderenza/Rigidità aumentate

Aderenza e rigidità sono le caratteristiche più importanti degli pneumatici ad alte prestazioni.

Gli pneumatici da gara lisci eccellono in entrambe le caratteristiche. La loro mescola speciale garantisce un'ottima aderenza, fondendo leggermente e attaccandosi alla superficie del tracciato quando si riscalda. Inoltre, per avere la massima rigidità del battistrada, non hanno scanalature. Gli pneumatici stradali concepiti per la guida ad alte prestazioni hanno un approccio simile, seppur meno estremo: utilizzano, infatti, mescole più morbide e battistrada con scanalature poco profonde. Tuttavia, su fondi bagnati, le scanalature sono essenziali per assicurare un buon smaltimento dell'acqua e il loro rendimento dipende proprio dal numero e dalla profondità delle scanalature. Di conseguenza, decidere quanto sviluppare le caratteristiche da bagnato e asciutto è un elemento chiave nella scelta delle gomme.

Ottenere la massima aderenza

Pneumatici ribassati

Il profilo di uno pneumatico descrive il rapporto tra la sua altezza e la sua larghezza. Usare pneumatici ribassati, cioè con un basso profilo, consente di aumentare la dimensione dello pneumatico senza incrementarne il diametro, e ciò non significa necessariamente aumentarne anche la larghezza. Uno dei vantaggi principali degli pneumatici ribassati è il fianco più corto che si piega meno in fase di sterzata e frenata, determinando una rigidità superiore con conseguenti miglioramenti anche nella risposta dello sterzo e nella tenuta. Tuttavia, un profilo più basso significa un cerchione più grande, con un aumento delle masse sospese che può andare a svantaggio della manovrabilità. Nella guida competitiva, però, il cerchio più grande consente di montare freni più grossi e potenti.

Mescola

La gomma usata per realizzare il battistrada è chiamata mescola e influenza l'aderenza dello pneumatico. Gli pneumatici ad alte prestazioni che danno priorità all'aderenza usano mescole morbide, in grado di aderire meglio al fondo stradale, mentre gli pneumatici da gara addirittura fondono leggermente per effetto del calore, in modo da garantire un'aderenza superiore. Tuttavia, pur avendo un'aderenza migliore, le mescole morbide si consumano più velocemente di quelle dure. Capire le caratteristiche della mescola usata è fondamentale per scegliere il giusto pneumatico. Un buon pilota dovrebbe anche sapere che la gomma tende a indurirsi col tempo e per questo motivo gli pneumatici tenderanno a perdere gradualmente aderenza, in particolare quelli con mescole più morbide.

Disegno del battistrada

La serie di scanalature sulla superficie di uno pneumatico è chiamata disegno del battistrada e serve a mantenere l'aderenza in condizioni di bagnato, eliminando l'acqua dalla superficie. Tuttavia, in condizioni di asciutto, le scanalature riducono la rigidità e, sotto sforzo, possono piegare la superficie, per esempio in fase di sterzata, frenata e accelerazione. Per questo motivo, gli pneumatici lisci da gara non hanno alcun tipo di scanalatura, mentre gli pneumatici sportivi usano un numero ridotto di scanalature poco profonde.

COMPONENTI AERODINAMICI

CAPITOLO 03 Elaborazione e impostazioni

Migliorare l'aerodinamica

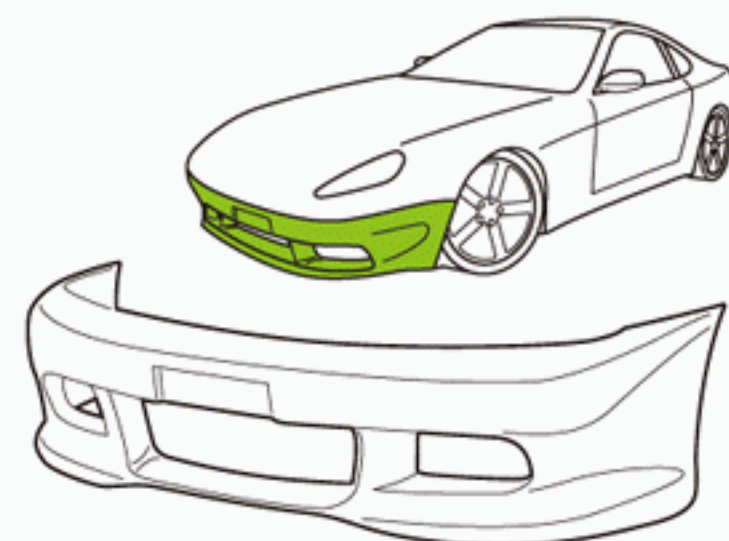
I miglioramenti aerodinamici sono essenziali per aumentare le prestazioni a velocità elevate. Tuttavia, è meglio procedere con prudenza, perché un approccio errato può creare più problemi che benefici.

Sfruttare l'aria

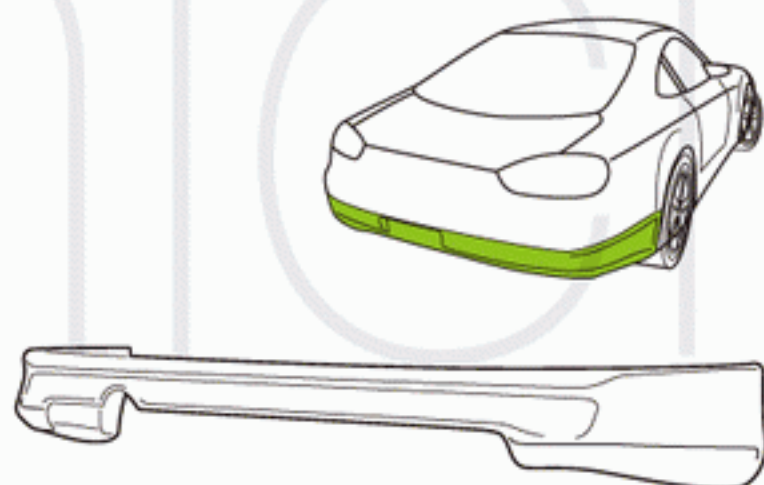
Regolazioni aerodinamiche

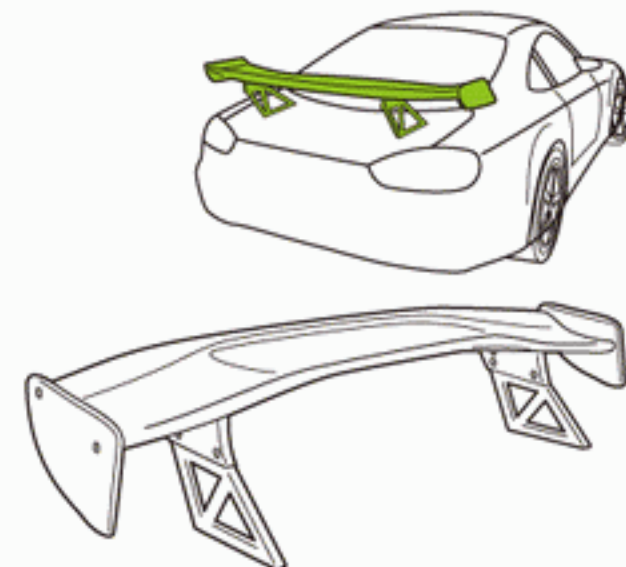
Le appendici aerodinamiche sono spesso usate per motivi estetici. Se impiegate correttamente, però, hanno un ruolo essenziale nella perfetta elaborazione di un'auto. Un'aerodinamica ben sviluppata, infatti, ridurrà la resistenza dell'aria, che limita la velocità, e la portanza, che spinge il corpo vettura verso l'alto, migliorando le prestazioni. Le appendici aerodinamiche creano deportanza, migliorando la stabilità e l'aderenza degli pneumatici alle alte andature. Tuttavia, non bisogna dimenticare che l'elaborazione aerodinamica influenzerà altri elementi come le sospensioni: se fatta in modo approssimativo, può addirittura ridurre le prestazioni del veicolo.

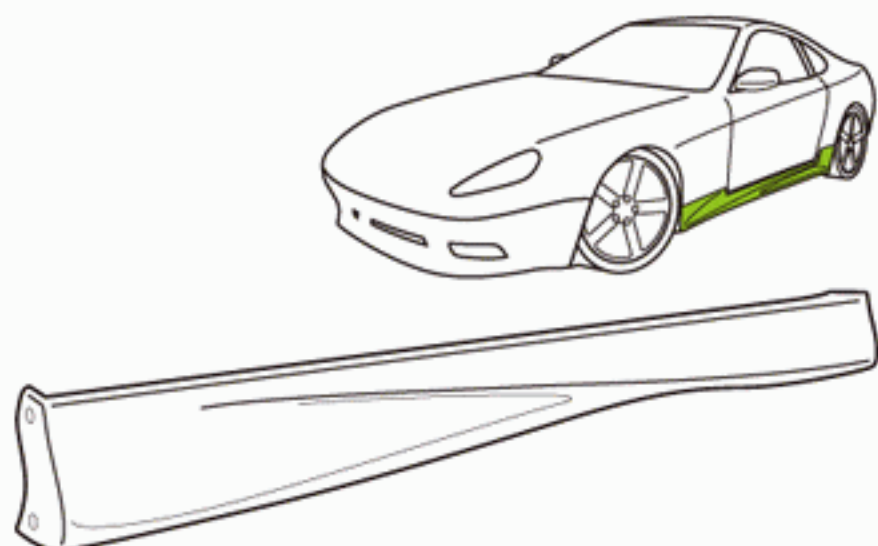
Spoiler anteriore

È concepito per ridurre il flusso d'aria sotto l'auto, diminuendo quindi la portanza. Se realizzato in modo scorretto, pur riducendo l'altezza da terra e abbassando il baricentro del veicolo, può addirittura avere l'effetto opposto, forzando il passaggio di aria ad alta pressione attraverso lo stretto spazio tra auto e fondo stradale e creando portanza. Nei casi peggiori, questo può portare alla totale perdita del controllo.

©GTA

Spoiler posteriore

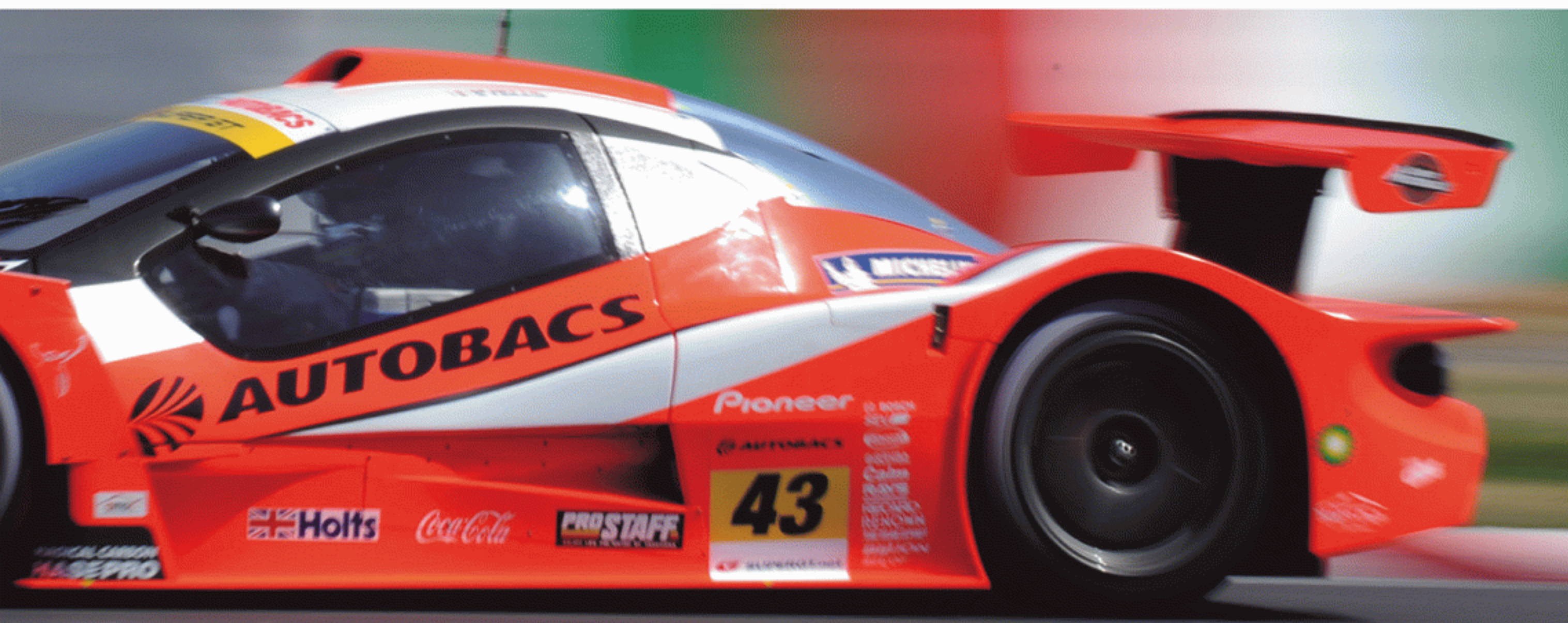
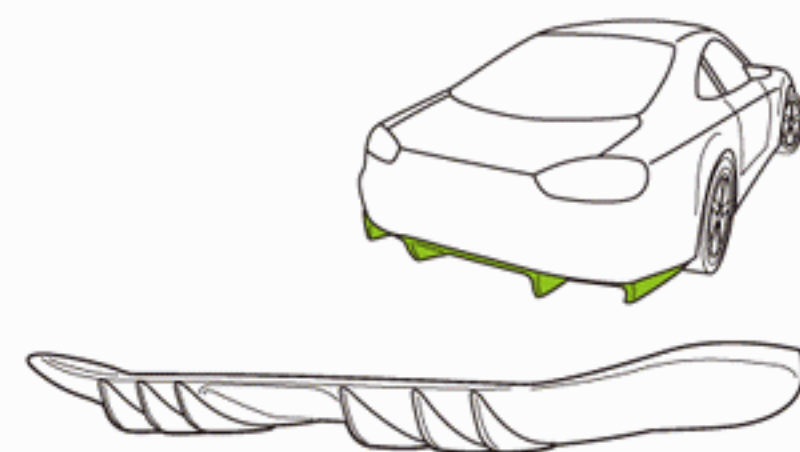
Questo elemento è concepito per ottimizzare la forma del paraurti posteriore, impedendo la formazione di turbolenze dietro l'auto e assicurando un flusso d'aria ottimale. Il paraurti e lo spoiler posteriore possono essere una sola componente, oppure lo spoiler può essere indipendente e fissato all'estremità inferiore del paraurti. Nel primo caso si parla di paraurti/spoiler posteriore, nel secondo di sotto-spoiler o minigonna posteriore.

Alettone posteriore

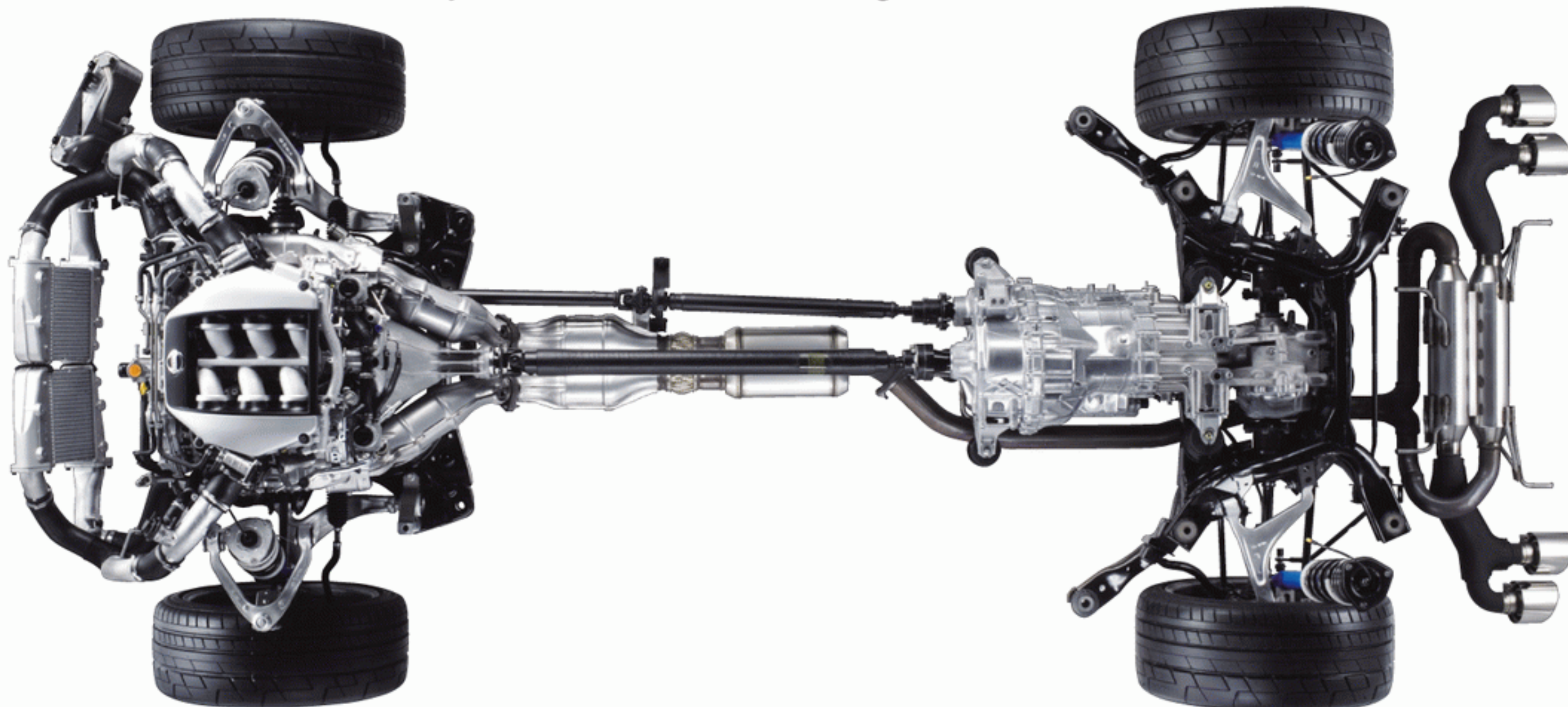
Montati sulla parte superiore e posteriore del corpo vettura, questi alettoni assicurano un flusso d'aria ottimale intorno all'auto, impedendo la formazione di turbolenze. La forma dell'alettone è concepita anche per contrastare la portanza, mentre la sua dimensione influenza il carico generato e, di conseguenza, l'aderenza degli pneumatici posteriori.

Spoiler laterali

Chiamati anche minigonne o bandelle laterali, sono montati sulla parte inferiore del corpo vettura, su entrambi i lati. Riducono la resistenza dell'aria lungo la fiancata dell'auto.

Diffusore posteriore

I diffusori sono montati sotto il paraurti posteriore e creano una pressione negativa, smaltendo in modo efficace il flusso d'aria sotto il corpo vettura e aumentando la deportanza. Sono usati spesso sulle auto da corsa e, più sono vicini all'asfalto, più sono efficaci.

CARATTERISTICHE

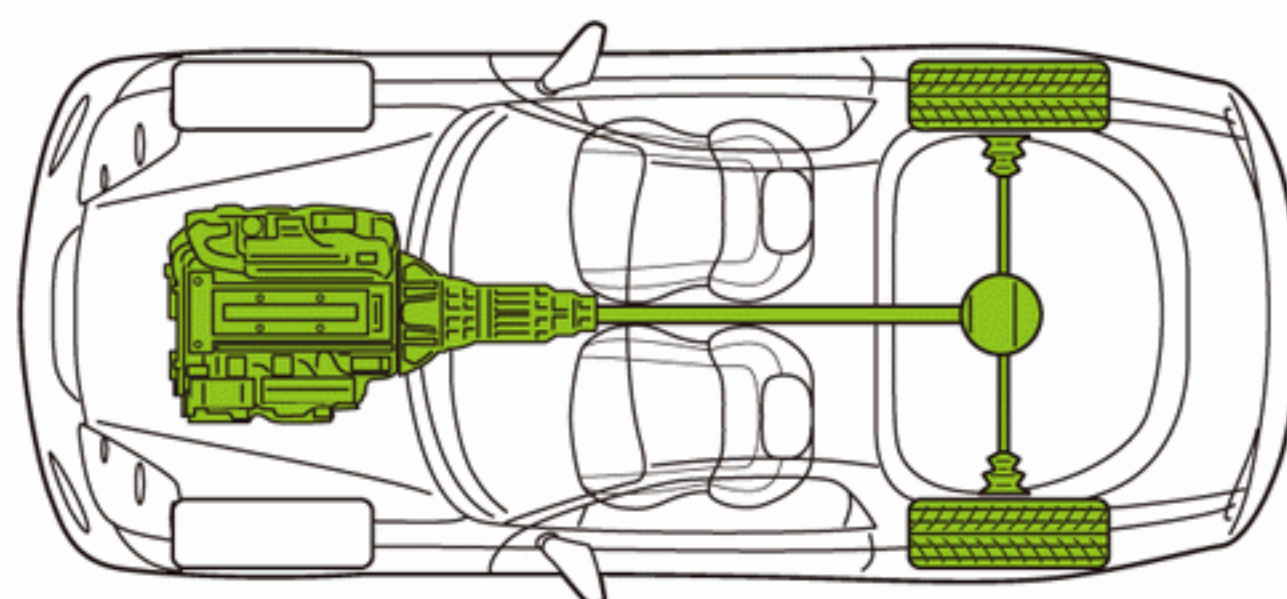
CAPITOLO 03 Elaborazione e impostazioni

Modificare le impostazioni in base alle caratteristiche dell'auto

Le elaborazioni sono tante e diverse quante lo sono le auto su cui applicarle. Tra le caratteristiche di ogni vettura, la configurazione della trasmissione è sicuramente quella che influenza maggiormente la tenuta di strada e il comportamento del veicolo. Perciò, prima di effettuare ogni modifica, è molto importante capire il comportamento delle diverse configurazioni.

Configurazione della trasmissione

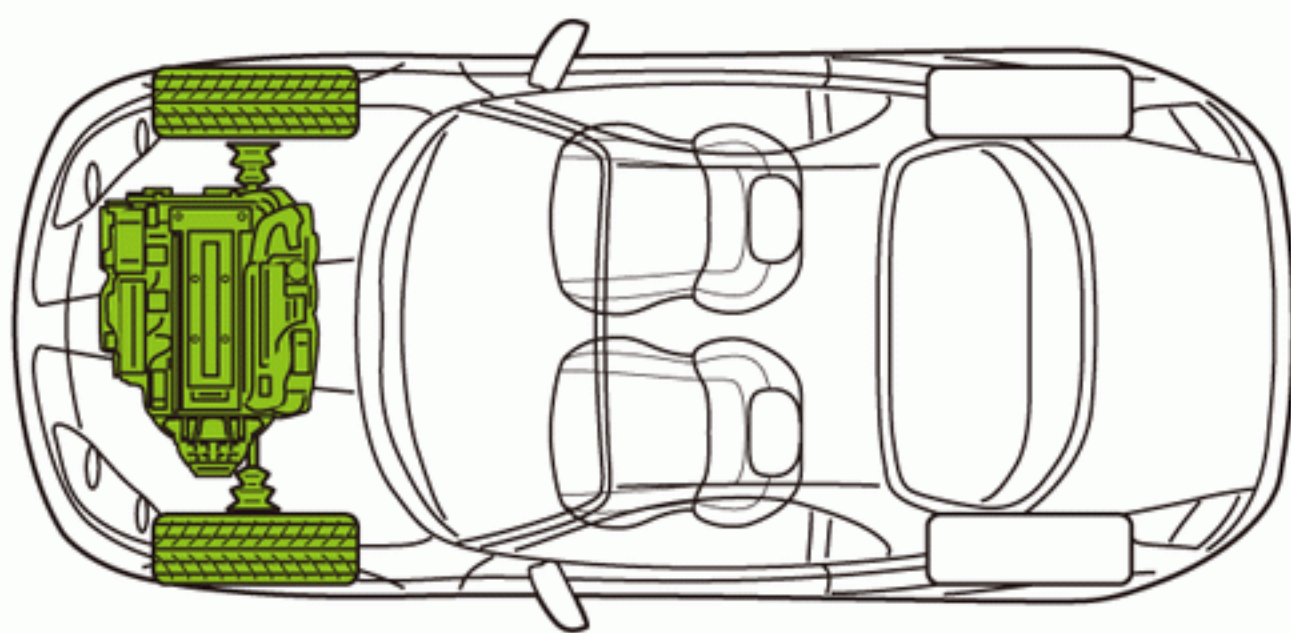
La configurazione della trasmissione ruota intorno alla posizione del motore, la parte più pesante dell'auto, e delle ruote che ne trasmettono la potenza. Ogni configurazione ha i suoi vantaggi e svantaggi e anche nelle sportive più avanzate il tipo di trasmissione resta determinante, poiché incide direttamente su comportamento e tenuta dell'auto. Cambiare la configurazione della trasmissione è difficile, ma è possibile valorizzarne i benefici e contrastarne i difetti. Una messa a punto in grado di sfruttare e migliorare la configurazione, le sospensioni e le caratteristiche aerodinamiche esistenti può migliorare in modo radicale la manovrabilità di una vettura.

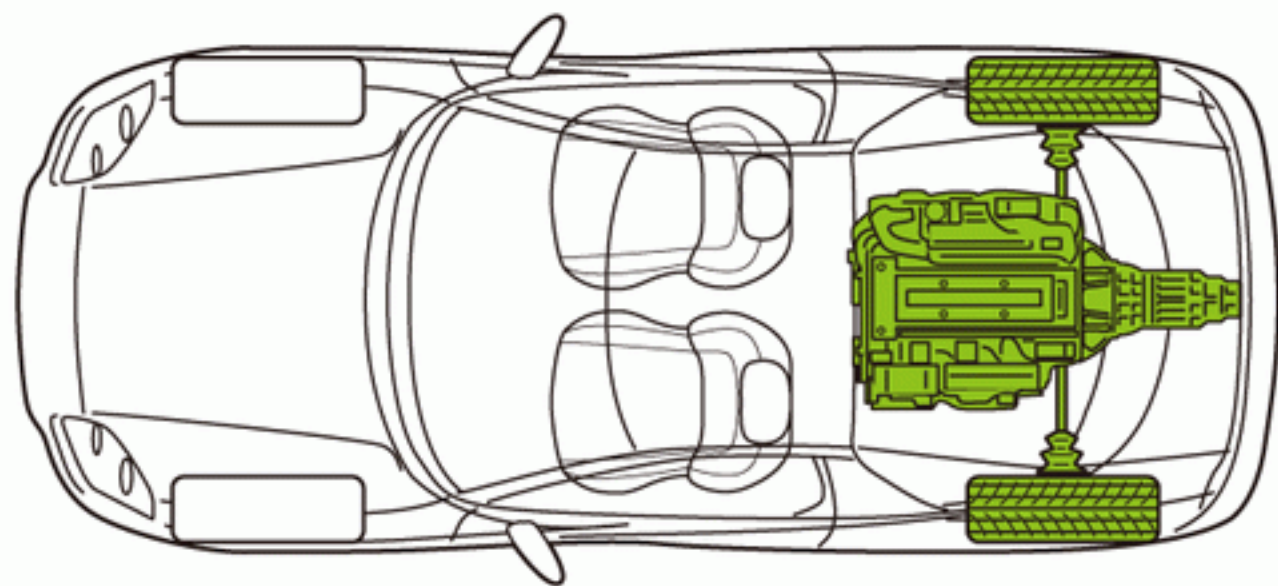
FR

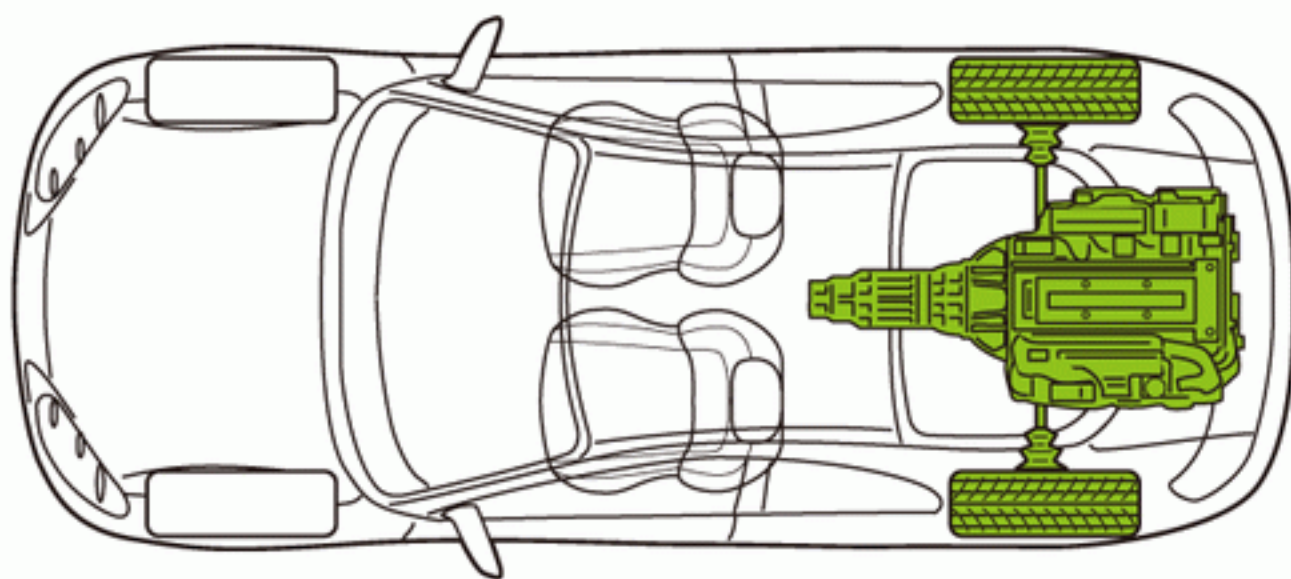
In presenza di una corretta distribuzione del peso, un'auto FR offre stabilità e prestazioni in curva di primo livello.

Nell'elaborazione di questo tipo di vettura è consigliabile migliorare la trazione al posteriore, per ridurre la sua tendenza a scivolare in fase di accelerazione. Spesso occorre anche intraprendere alcune misure per contrastare gli effetti negativi in fase di accelerazione, dovuti al minor peso all'anteriore, che rendono più difficile seguire la linea desiderata e inducono il sottosterzo.

Compensa i punti deboli, migliora i punti di forza

FF

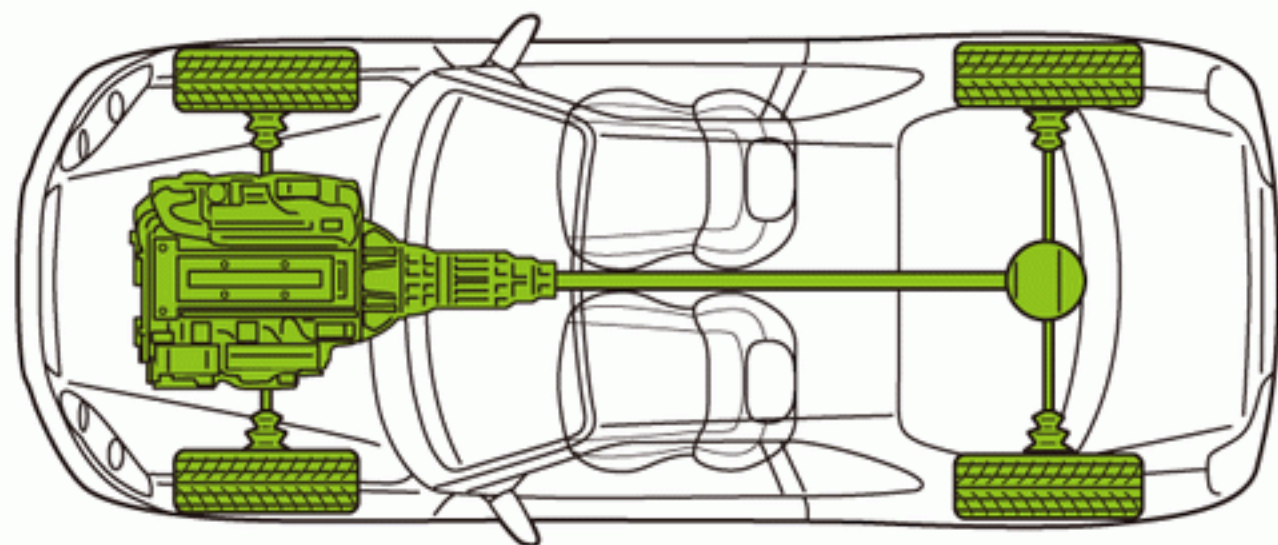
In un'auto FF, il motore, la trazione e le ruote sterzanti sono tutte concentrate nella parte anteriore, perciò spesso la tentazione è di focalizzarsi solo in quel punto: in realtà, anche il retrotreno richiede molta attenzione. Su un percorso molto veloce occorre massimizzare la stabilità, mentre su un percorso con molte curve occorre soprattutto consentire al posteriore di scivolare più facilmente in rilascio, garantendo una sterzata più efficace. Le auto FF solitamente montano differenziali autobloccanti a 1 via, che si attivano solo in fase di accelerazione.

MR

La posizione centrale del motore garantisce un buon assetto in accelerazione e frenata. È possibile avere anche un'ottima sterzata ma, se l'auto è spinta al limite, il minore carico all'anteriore può portare a un forte sottosterzo, facendo sbandare il posteriore in modo piuttosto rapido e violento, complicando la guida. In fase di elaborazione, va posta molta attenzione nel mantenere la capacità di sterzata in inserimento di curva, quindi la trazione nella fase di accelerazione in uscita. Occorre bilanciare con cura anche il carico aerodinamico anteriore e posteriore.

RR

La combinazione di motore e trazione posteriore garantisce un'ottima accelerazione e decelerazione, ma il minor peso sull'anteriore rispetto a una configurazione MR porta a un maggior sottosterzo in curva. Inoltre, se l'auto è spinta al limite in fase di sterzata, il pesante posteriore determinerà un effetto pendolo, oscillando pericolosamente e causando un sovrasterzo improvviso. Elaborando questo tipo di configurazione è importante migliorare la capacità di inserimento in curva.

4WD

In base alla configurazione della trasmissione della 4WD, l'auto si comporterà in modo diverso: in generale, però, un veicolo a quattro ruote motrici presenta più difficoltà in fase di sterzata a causa della sua elevatissima stabilità, perciò l'elaborazione dovrebbe migliorare soprattutto l'inserimento in curva. Generalmente, su vetture di questo tipo si utilizza un differenziale LSD a 1 via sull'anteriore e uno a 2 vie nel retrotreno.

IMPOSTAZIONI

CAPITOLO 03 Elaborazione e impostazioni

Impostazioni di base dei singoli componenti

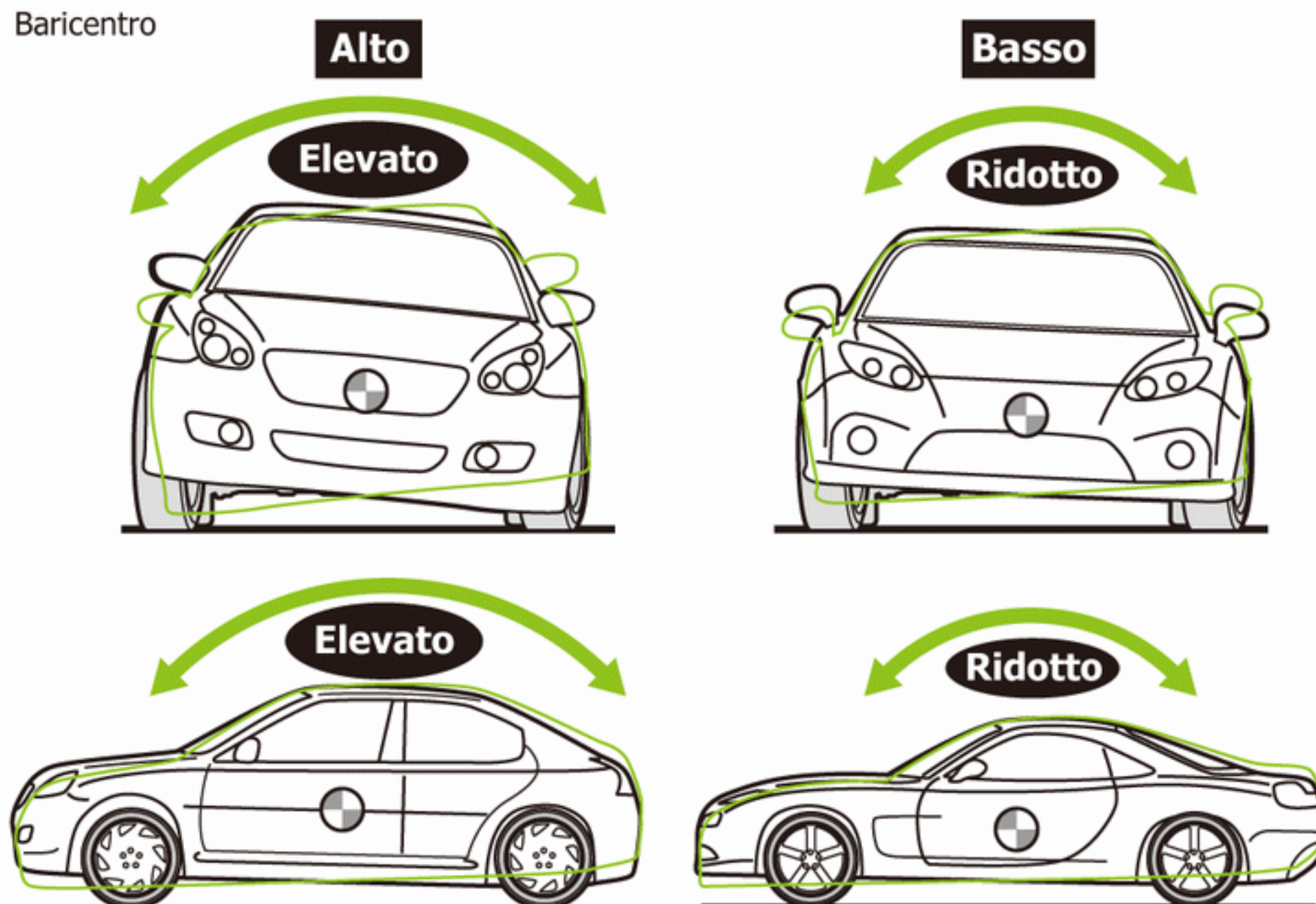
Montare parti ad alte prestazioni non basta per rendere l'auto più veloce. L'unico metodo efficace per migliorare la performance di un veicolo nel suo complesso consiste nel trovare impostazioni efficaci per l'equilibrio generale, sfruttando al meglio il potenziale di ogni componente.

Sospensioni
[Altezza dal suolo/Rigidezza delle molle]

Modifica del comportamento dell'auto

Se le condizioni della strada sono buone e il fondo stradale è pianeggiante, è possibile ridurre l'altezza dal suolo della vettura, abbassando di conseguenza il baricentro e riducendo il beccheggio in fase di accelerazione e decelerazione, oltre al rollio durante le sterzate, migliorando così le prestazioni globali. È inoltre possibile ottimizzare il comportamento dell'auto impostando altezze diverse per le sospensioni anteriori e per quelle posteriori. Se, per esempio, le sospensioni anteriori sono più basse rispetto alle posteriori, le ruote anteriori avranno una maggiore presa in ingresso di curva e la vettura sterzerà in modo più uniforme. Nelle vetture FF questa operazione può essere utilizzata anche per mitigare la tendenza dell'avantreno ad alzarsi durante l'accelerazione.

Anche la rigidezza delle molle ha un impatto notevole sul movimento della vettura. Spesso si ritiene che molle più rigide siano migliori, ma non sempre questo è vero. Le sospensioni più rigide possono compensare fenomeni negativi, come beccheggio, imbardata e rollio, analogamente a quanto avviene riducendo l'altezza di guida. Tuttavia, se sono troppo dure, il contraccolpo sul fondo stradale può diventare così importante da compromettere il contatto fra pneumatici e terreno, con conseguente perdita di trazione. Per questo motivo, la rigidezza delle molle deve essere calibrata attentamente, in modo che l'auto non risulti troppo rigida o troppo morbida.

La rigidezza delle molle ha un impatto notevole anche sulla tenuta di strada. Una rigidezza troppo elevata sull'avantreno può comportare problemi di sottosterzo, mentre sul retrotreno può comportare un aumento del sovrasterzo, che è tuttavia dipendente in parte anche dallo smorzamento. Per questo, i due parametri devono essere sempre considerati insieme.

Un equilibrio corretto tra sospensioni anteriori e posteriori

Sospensioni
[Smorzamento]

Controllare compressione ed estensione delle molle

Gli ammortizzatori, esercitando una forza detta "smorzamento", controllano la velocità con cui le molle si espandono e contraggono quando sono sotto carico. Lo smorzamento è generato dalla resistenza dell'olio o gas racchiuso nel pistone dell'ammortizzatore, quando questo si abbassa o si alza. Uno smorzamento elevato ferma rapidamente il movimento delle molle, mentre uno smorzamento ridotto le lascia oscillare per più tempo.

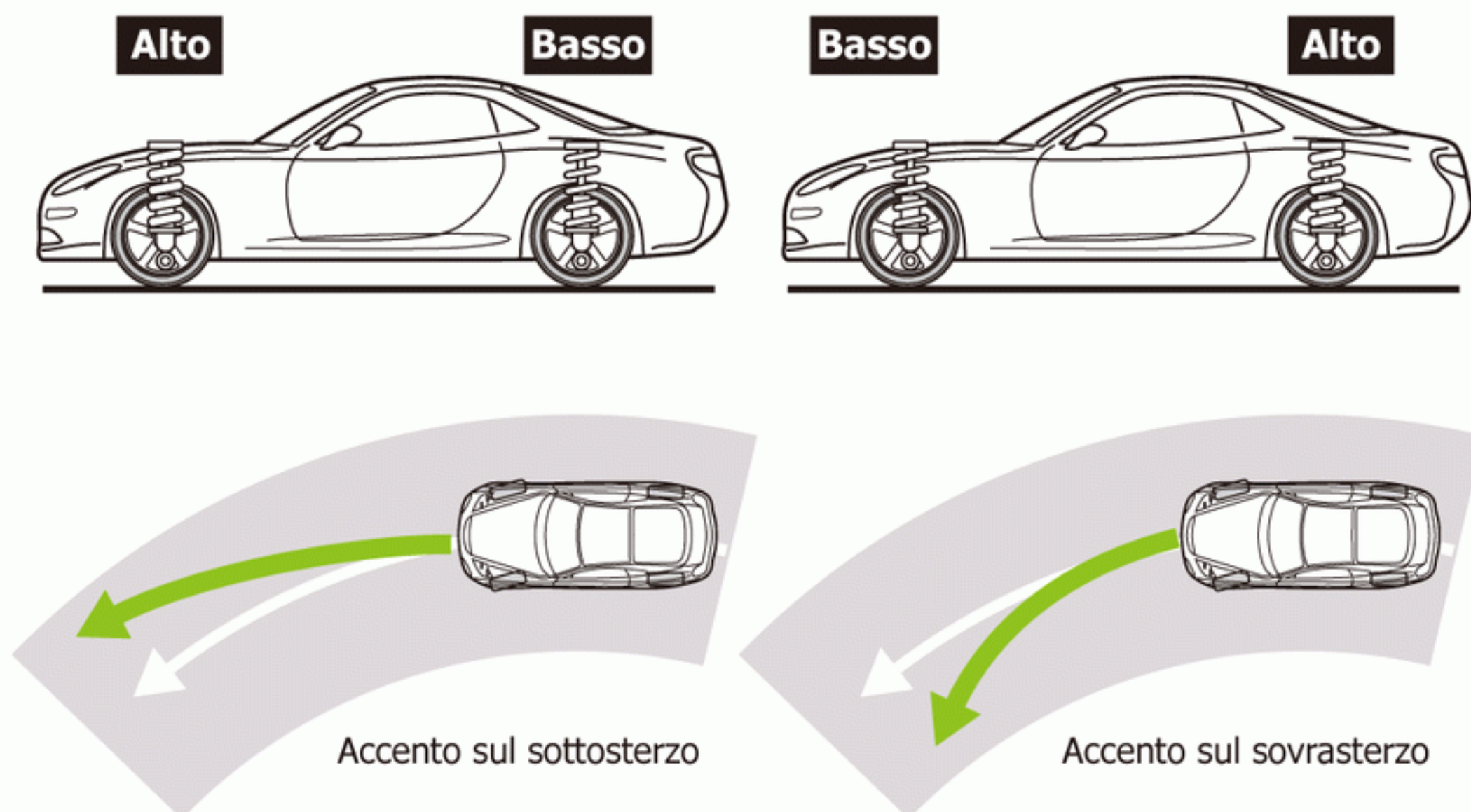
Lo smorzamento può essere regolato indipendentemente per l'estensione e la compressione delle molle, per controllare con precisione la tenuta di strada e il comportamento dell'auto. Un maggiore smorzamento in compressione rallenta l'abbassamento del muso in frenata, il rollio in curva e altri movimenti del corpo vettura; tuttavia la scocca risulterà più rigida, perciò è facile che le ruote perdano contatto con il suolo su fondo accidentato e il trasferimento del carico sarà meno efficace. Un maggiore smorzamento in estensione, invece, aiuta a ridurre i movimenti anomali, opponendosi per esempio alla tendenza del muso ad alzarsi in uscita da una curva. Le sospensioni anteriori non si estenderanno immediatamente, mantenendo così le ruote dell'avantreno a contatto con il suolo.

È possibile modificare le caratteristiche di tenuta anche cambiando lo smorzamento in estensione/compressione tra avantreno e retrotreno. Riducendo lo smorzamento in compressione sulle ruote anteriori, queste riceveranno un carico maggiore nelle curve e garantiranno più aderenza, facendo calare il sottosterzo. Passando al retrotreno, possiamo ridurre lo smorzamento in estensione per avere sovrasterzo o aumentarlo per provocare il sottosterzo. In genere, è consigliabile regolare lo smorzamento in compressione prima di quello in estensione.

Smorzamento all'avantreno e retrotreno (in compressione)

Alto
Basso
Basso
Alto

Accento sul sottosterzo

Accento sul sovrasterzo

Sospensioni
[Allineamento delle ruote: angolo di campanatura]

Benefici di una campanatura negativa

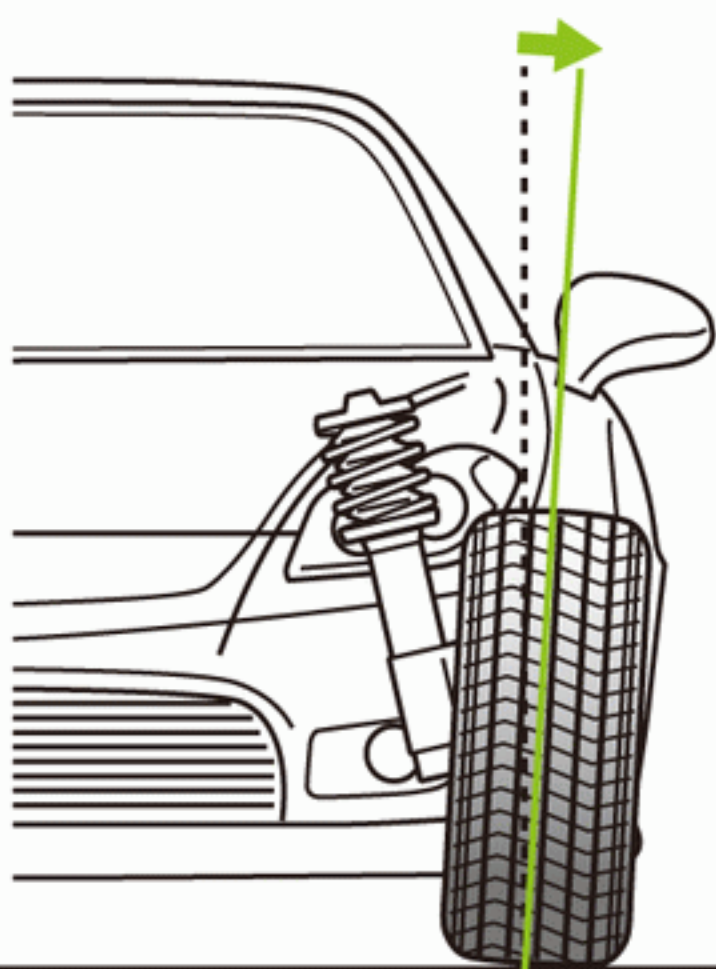
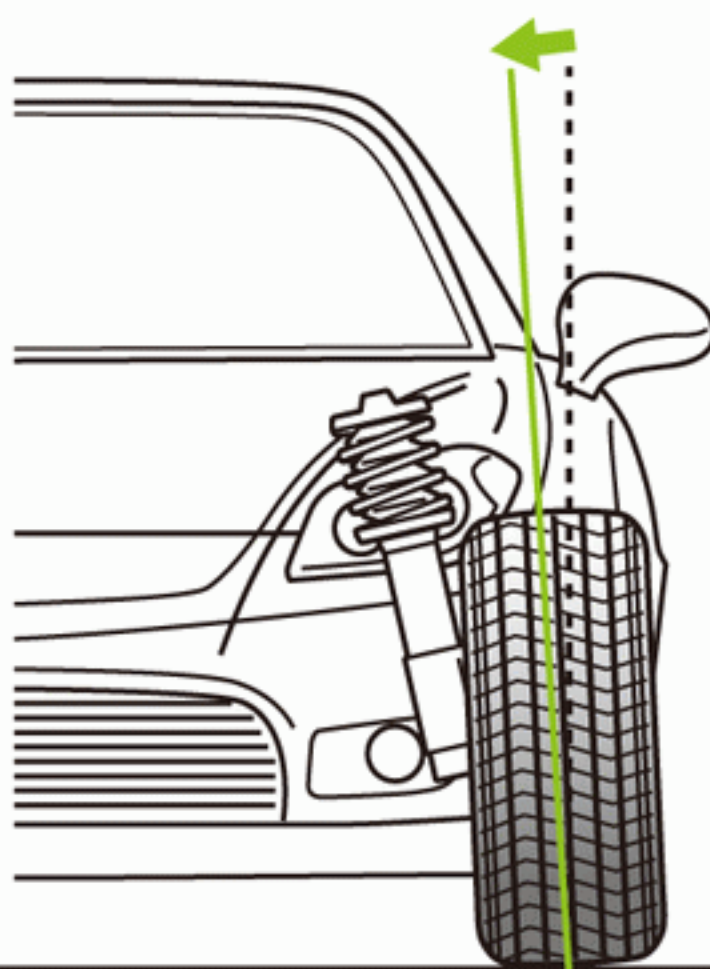
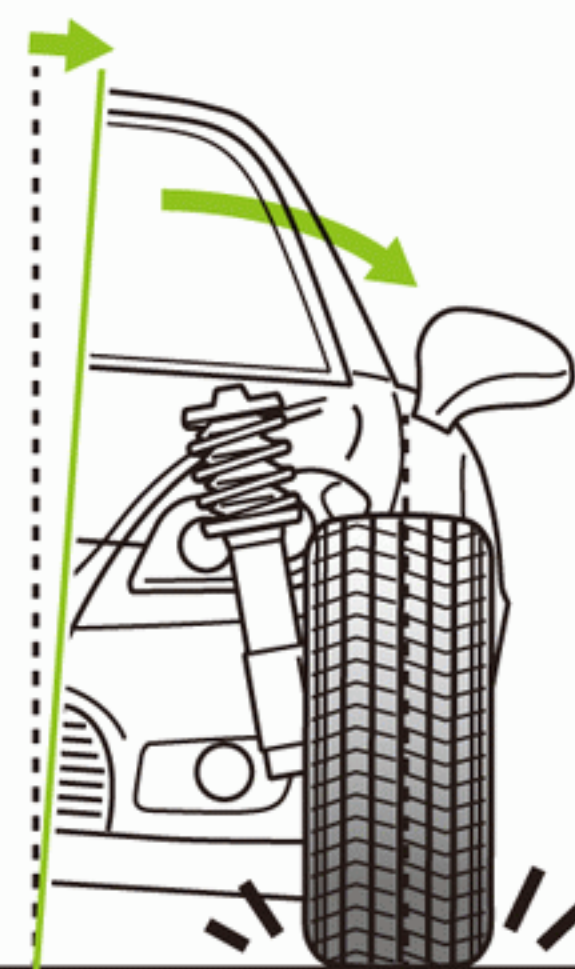
L'angolazione di allineamento delle ruote che viene modificata con maggiore frequenza è la campanatura. Si parla di campanatura negativa quando la distanza tra il lato inferiore delle ruote è superiore a quella tra il lato superiore, e di campanatura positiva nella situazione opposta, con le ruote che puntano verso il centro dell'auto.

In curva, la forza centrifuga fa inclinare l'auto verso l'esterno. In questi casi, una campanatura negativa permette un maggiore contatto tra pneumatico e strada e, quindi, una trazione migliore. Quando si parla di "aumentare la campanatura", in genere, si intende proprio questo aumento di campanatura negativa.

Tuttavia, la campanatura negativa è uno svantaggio in rettilineo: gli pneumatici non sono perpendicolari al terreno, pertanto è più difficile guadagnare trazione e la sterzata risente più facilmente delle irregolarità del fondo stradale. L'angolo delle ruote aumenta inoltre la resistenza, ostacolando l'accelerazione, e riduce la superficie di contatto tra pneumatico e suolo, andando ad aumentare le distanze di frenata. Questi effetti negativi dipendono dall'entità della campanatura negativa: più questa è elevata, maggiori sono gli effetti negativi in rettilineo. Pertanto, è bene non effettuare modifiche drastiche a cuor leggero.

Quando si applica una campanatura negativa, è importante considerare l'effetto del bilanciamento dei pesi tra avantreno e retrotreno in curva. Se il carico è principalmente anteriore, la campanatura negativa sull'avantreno dovrà essere maggiore rispetto a quella sul retrotreno minore, per ridurre il rischio di sottosterzo.

La campanatura positiva non viene quasi mai usata, in quanto riduce l'aderenza e rende eccessivamente instabile il comportamento dell'auto.

Campanatura positiva

Campanatura negativa

Rollio in curva
La campanatura negativa aumenta l'aderenza in curva.

Aderenza ottimale

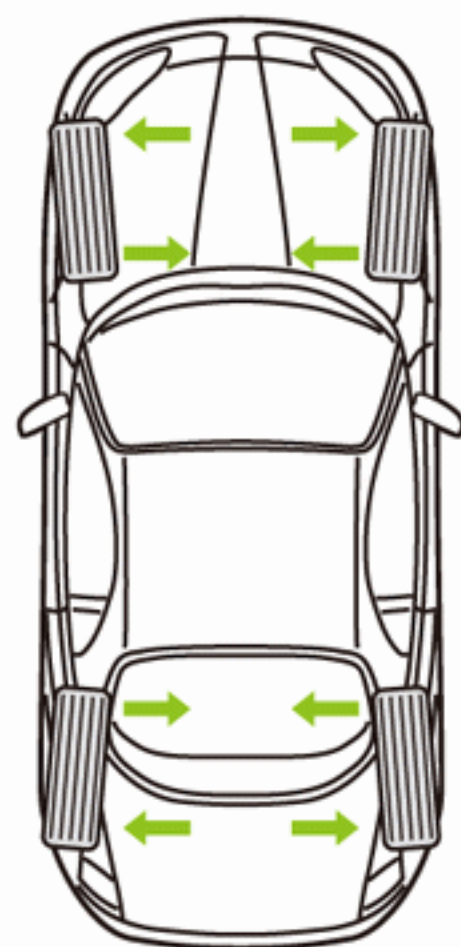
Sospensioni

[Allineamento delle ruote/Angolo di convergenza]

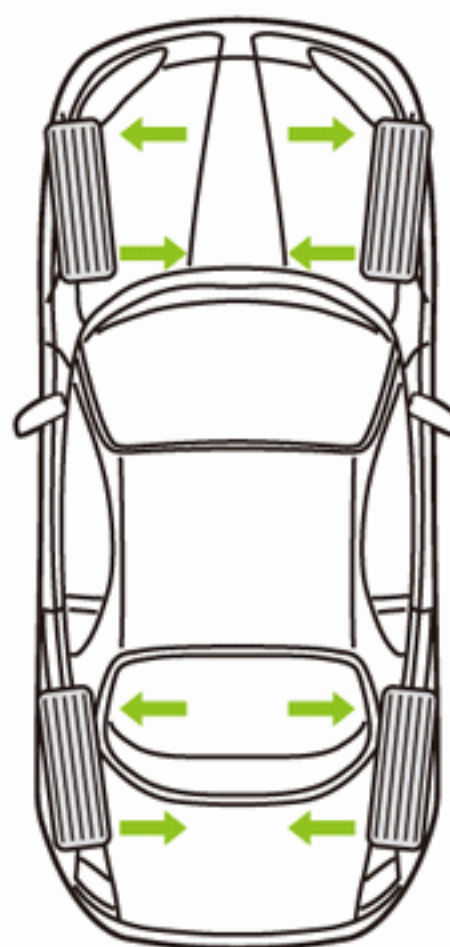
Un piccolo angolo con grandi effetti sulla stabilità

La convergenza è l'angolo tra le ruote sul piano orizzontale, con la vettura vista dall'alto. Ha un ruolo importante nel mantenere la stabilità quando il bilanciamento dei carichi tra destra e sinistra cambia notevolmente. Per esempio, quando il carico si porta sulle ruote esterne in curva, l'angolo di quelle ruote ha un effetto notevole sul comportamento dell'auto: per questo motivo, la convergenza è un elemento importante per la stabilità.

Più propriamente, si parla di "convergenza" quando la parte anteriore delle ruote è rivolta verso l'interno e di "divergenza" quando è rivolta verso l'esterno. In termini di tenuta, una convergenza sull'avantreno e una divergenza sul retrotreno causano una maggiore tendenza al sovrasterzo, mentre la situazione opposta porta al sottosterzo. Inoltre, a volte le ruote anteriori vengono poste in divergenza per rendere più regolare il comportamento in curva.

Esiste un intricato equilibrio tra passo, carreggiata, campanatura, potenza del motore e convergenza, e questa viene spesso regolata per ultima per correggere le piccole variazioni introdotte dagli altri fattori o mettere a punto la tenuta. Una convergenza ampia provoca una resistenza notevole, perciò le modifiche sono sempre molto ridotte. In particolare, la convergenza del retrotreno influisce molto su tenuta e guida, perciò la convergenza anteriore viene generalmente regolata per prima, lasciando alla convergenza posteriore solo modifiche minime.

F Convergenza
Risposta dell'avantreno → Tendenza marcata al sottosterzo.
R Convergenza

F Convergenza
Risposta dell'avantreno → Tendenza marcata al sovrasterzo.
R Divergenza

F Divergenza
Risposta dell'avantreno → Tendenza marcata al sottosterzo.
R Convergenza

F Divergenza
Risposta dell'avantreno → Tendenza marcata al sovrasterzo.
R Divergenza

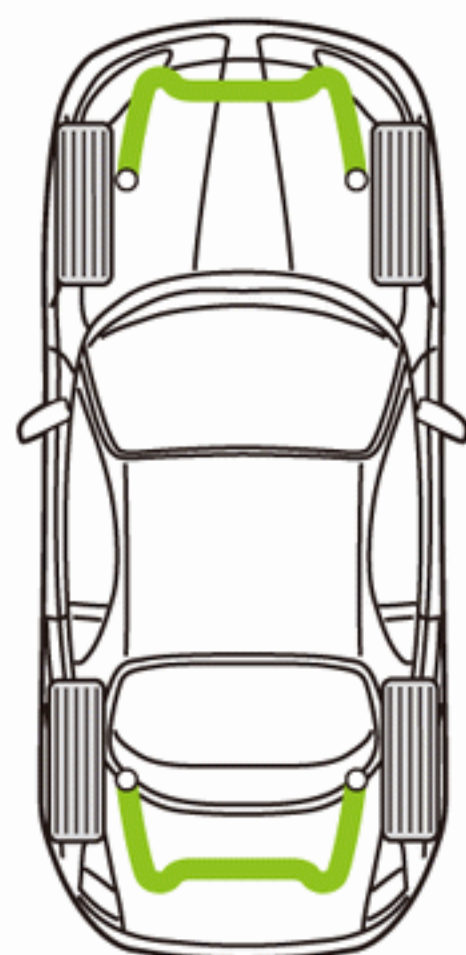
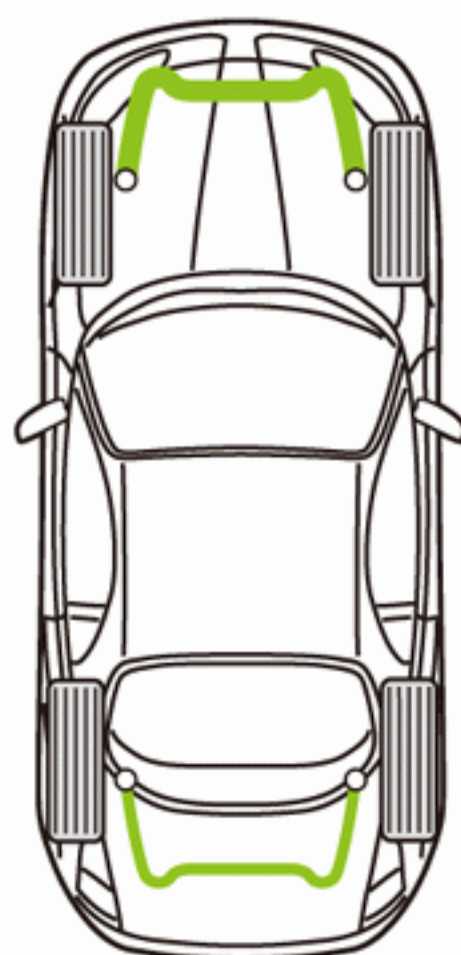
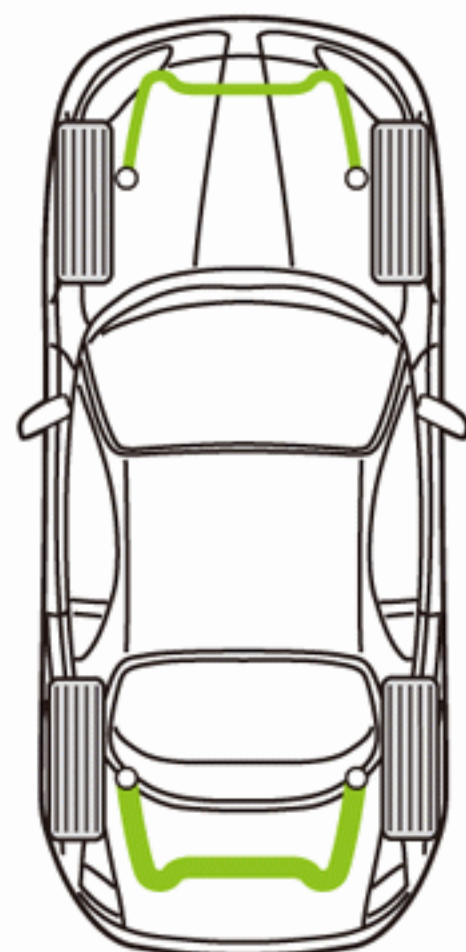
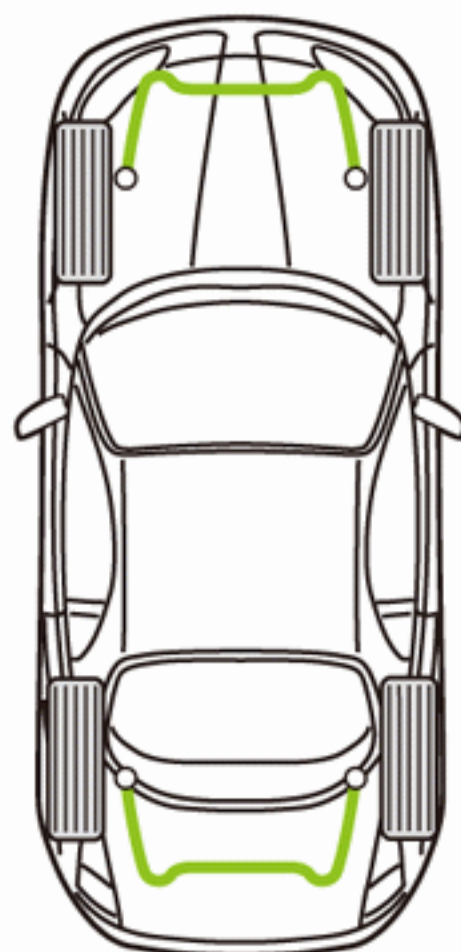
Sospensioni

[Barra antirollio/Rigidità della barra stabilizzatrice]

Un'ultima messa a punto

La barra stabilizzatrice è una barra antitorsione che collega i bracci inferiori delle sospensioni destre e sinistre e reagisce al momento torcente a cui è sottoposta. Quando in curva si azionano le sospensioni da un lato, la resistenza delle sospensioni dell'altro lato reagisce riducendo il rollio e tenendo una superficie più ampia dello pneumatico a contatto con il suolo. La rigidità di questa barra è rappresentata da un coefficiente elastico, come nelle molle di una sospensione, e aumentando la rigidità della barra stabilizzatrice anteriore migliora la risposta dello sterzo.

Quando si regola la barra stabilizzatrice, è importante non impostare una rigidità superiore a quella delle molle delle sospensioni. In caso contrario, le sospensioni sarebbero troppo deboli per contrastare l'effetto della barra: con il carico che si sposta sull'esterno, la barra stabilizzatrice solleverebbe la sospensione interna e, di conseguenza, la ruota dal suolo, perdendo trazione.

Teoricamente, si potrebbe regolare l'assetto modificando la rigidità della barra stabilizzatrice anteriore e di quella posteriore, ma per questo è solitamente sufficiente regolare molle e ammortizzatori: introdurre nell'equazione la rigidità della barra stabilizzatrice è un'inutile complicazione che rende difficile ottenere i risultati voluti. La regolazione delle barre stabilizzatrici è più un tocco finale, piuttosto che un metodo di elaborazione a sé stante.

F Alta
Risposta dell'avantreno → Tendenza marcata al sovrasterzo.
R Alta

F Alta
Risposta dell'avantreno → Tendenza marcata al sottosterzo.
R Bassa

F Bassa
Risposta dell'avantreno → Tendenza marcata al sovrasterzo.
R Alta

F Bassa
Risposta dell'avantreno → Tendenza marcata al sottosterzo.
R Bassa

Cambiando il limite cambia la manovrabilità

La coppia iniziale determina il momento in cui si attiva il differenziale autobloccante: più è elevata, più facilmente il differenziale si blocca e maggiore è la risposta in accelerazione. A una coppia iniziale minore corrisponde un effetto più lento del differenziale autobloccante.

In generale, una maggiore coppia iniziale accentua le caratteristiche di tenuta della configurazione della vettura, vale a dire il sovrasterzo nelle auto a trazione posteriore e il sottosterzo in quelle a trazione anteriore. In entrambi i casi, migliora la trazione ma rende più difficili le manovre in curva. Pertanto, la coppia iniziale va regolata considerando il livello di tenuta di strada che si desidera ottenere.

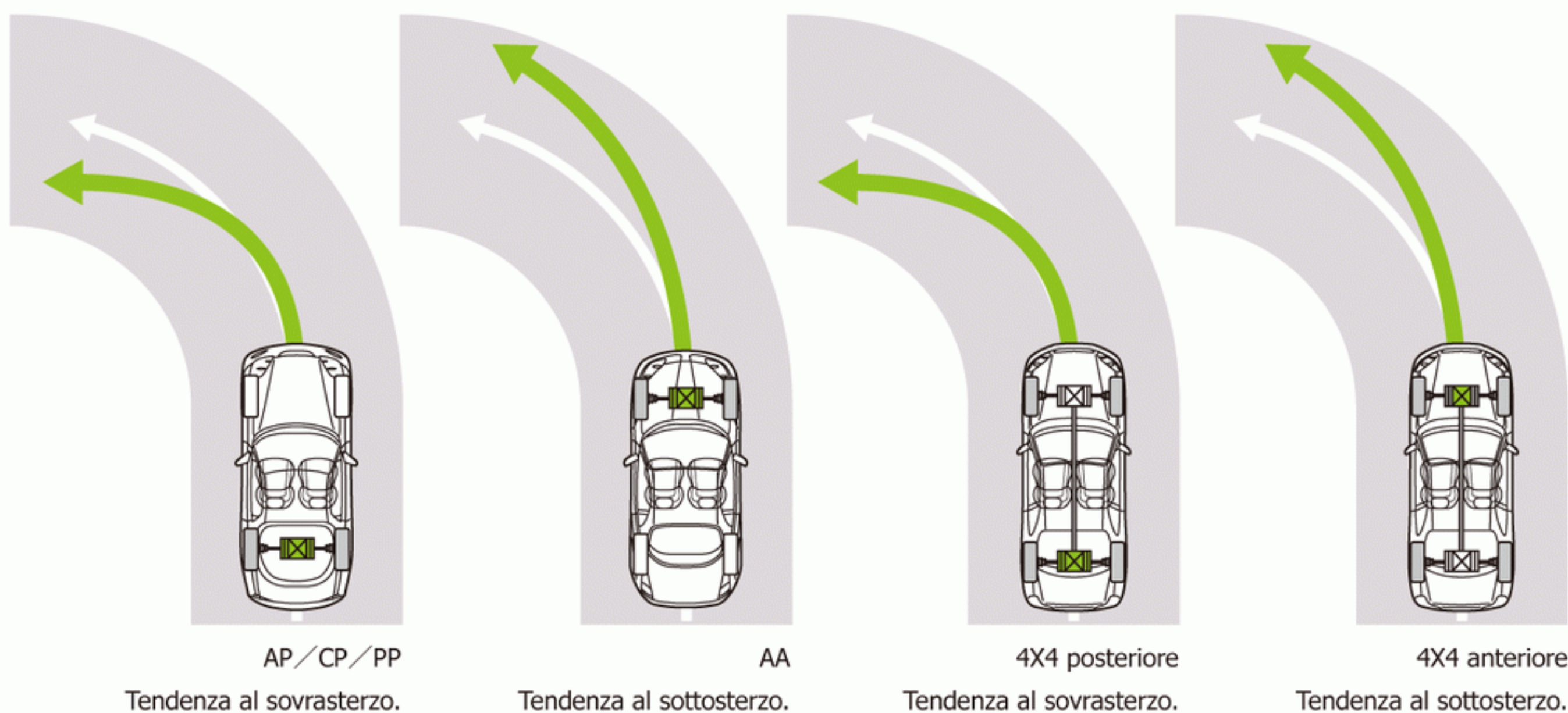
Un'altra regolazione riguarda il comportamento del differenziale autobloccante in accelerazione e decelerazione. L'impostazione di accelerazione determina l'efficacia del differenziale quando viene premuto l'acceleratore: più è elevata, più potenza viene trasmessa alle ruote e più rapida sarà l'auto in curva. Tuttavia, il comportamento della vettura diverrà più nervoso: pilotare la vettura verso un'uscita corretta dalla curva può richiedere una certa abilità.

L'impostazione di decelerazione determina l'efficacia del differenziale quando l'acceleratore non è premuto: un'impostazione elevata dà maggiore stabilità in inserimento di curva, permettendo di frenare e curvare all'ultimo istante, dato che è possibile prolungare la frenata. Questo assetto complica però la manovra in curva ed è consigliato solo per i piloti più esperti, capaci di compensare il sottosterzo iniziale.

AP／CP／PP
Tendenza al sovrasterzo.

AA
Tendenza al sottosterzo.

4X4 posteriore
Tendenza al sovrasterzo.

4X4 anteriore
Tendenza al sottosterzo.

Modifica del comportamento in curva

Trasmissione
[Rapporto del cambio]

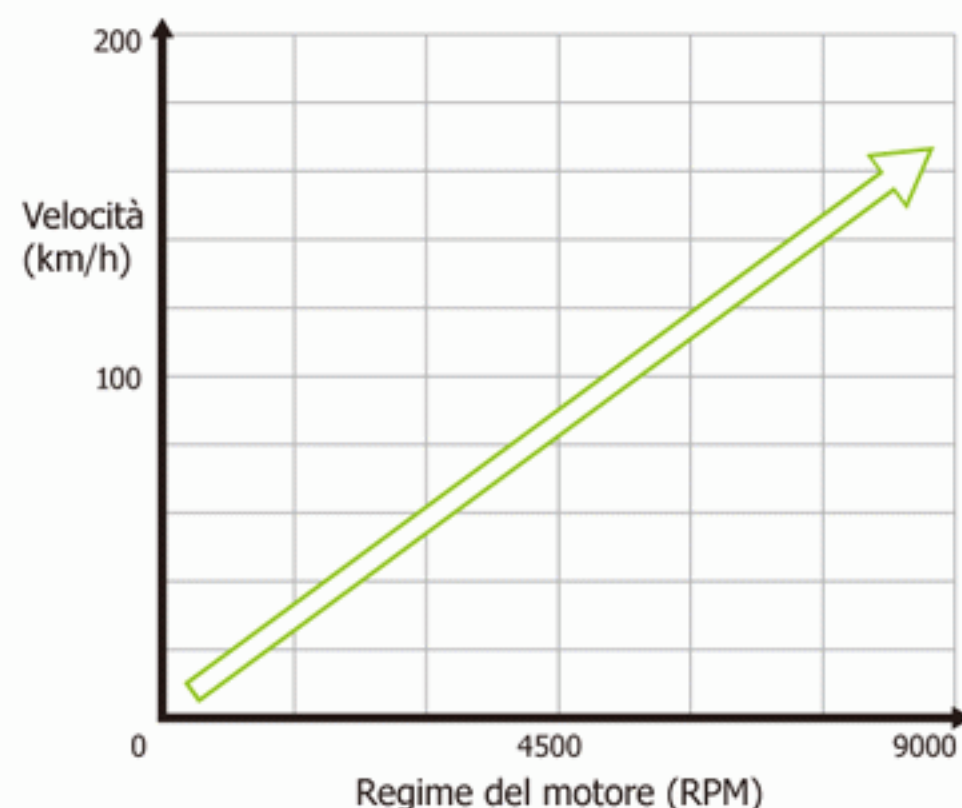
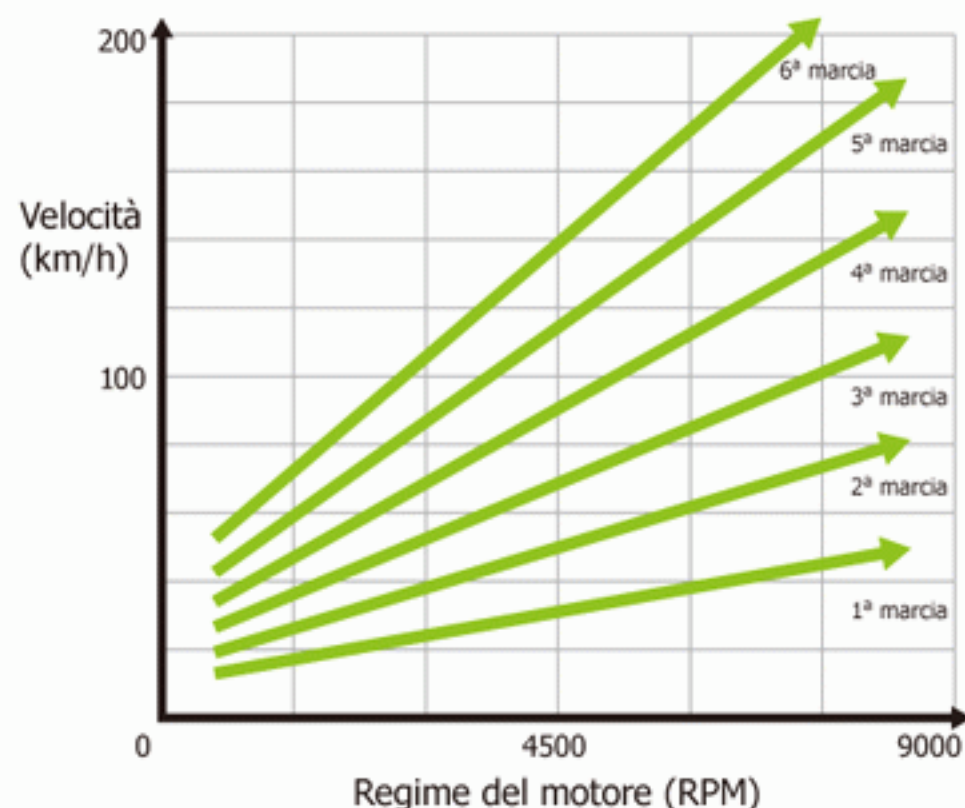
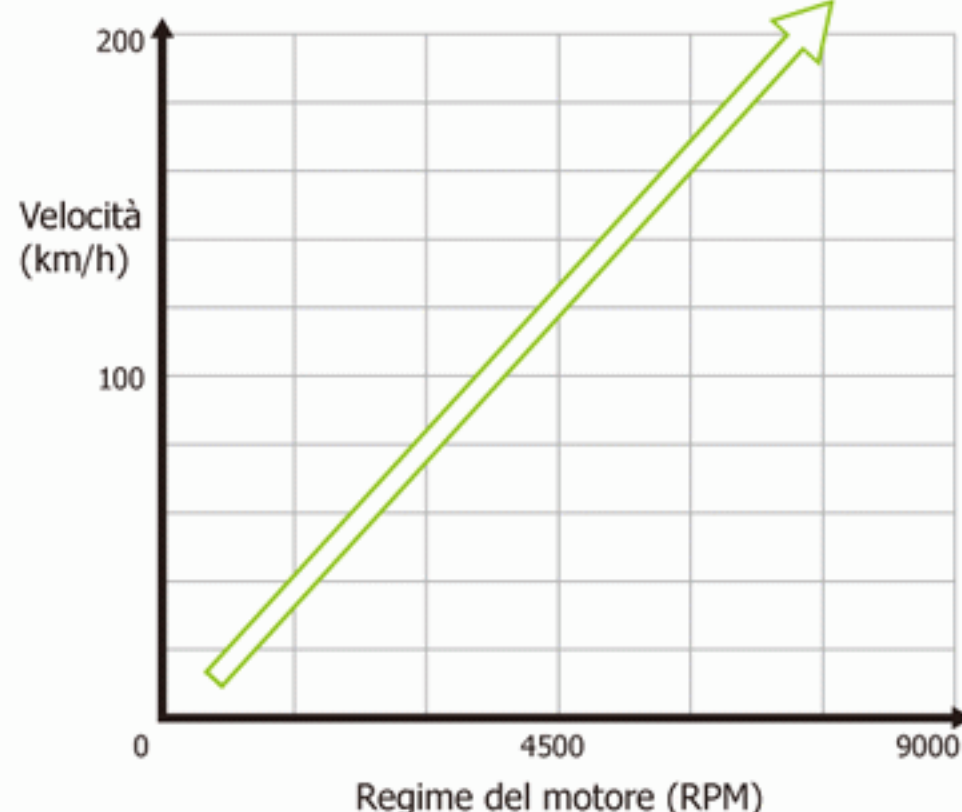
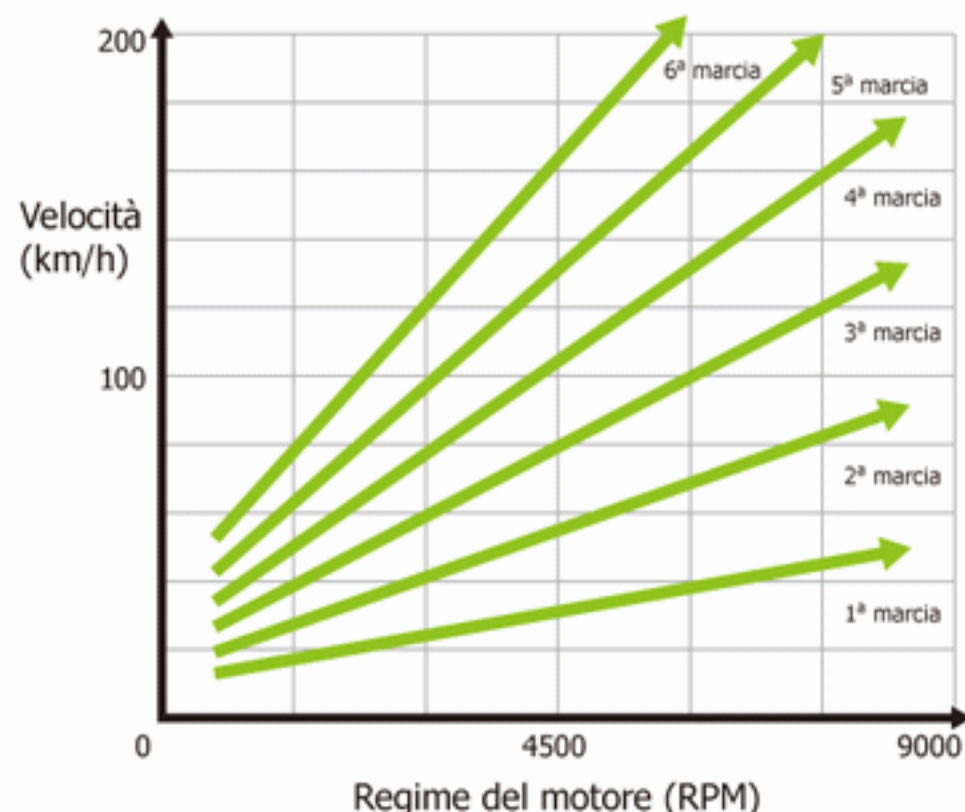
Conservare potenza con rapporti corti

Le auto da gara devono correre su circuiti di ogni genere, da tracciati sinuosi e tortuosi ad altri con lunghi e veloci rettilinei. Per sfruttare al massimo il motore su un dato percorso, è spesso necessario cambiare i rapporti della trasmissione: questo solitamente significa intervenire sul rapporto finale e su tutti gli altri rapporti del cambio.

Quando si affronta un tracciato con molte curve lente e medie, l'accelerazione in uscita dalla curva conta più della velocità di punta. In questo caso, un cambio con marce a rapporti simili tra loro permette di restare più facilmente nella banda di potenza: è la configurazione detta "a rapporti corti".

In un circuito caratterizzato invece da lunghi rettilinei, in cui è importante la velocità, è più efficace una configurazione che dia la massima velocità di punta, con rapporti minori per la quinta e sesta marcia: è la configurazione detta "a rapporti lunghi".

L'ultimo rapporto del cambio influisce sul comportamento generale: se i rapporti del cambio restano gli stessi ma viene ridotto l'ultimo, si avrà una maggiore accelerazione ma velocità di punta minore, mentre un rapporto finale più alto aumenta la velocità di punta a scapito dell'accelerazione. Quando si inizia la configurazione delle marce, è preferibile iniziare proprio dall'ultimo rapporto, in modo che il motore raggiunga il massimo dei giri quando lo utilizza nel punto più veloce del circuito.

Su un tracciato con molte curve, rapporti più vicini danno più risalto all'accelerazione.

Sui circuiti ad alta velocità con lunghi rettilinei, i rapporti più lunghi aumentano la velocità di punta.

Aerodinamica

[Deportanza]

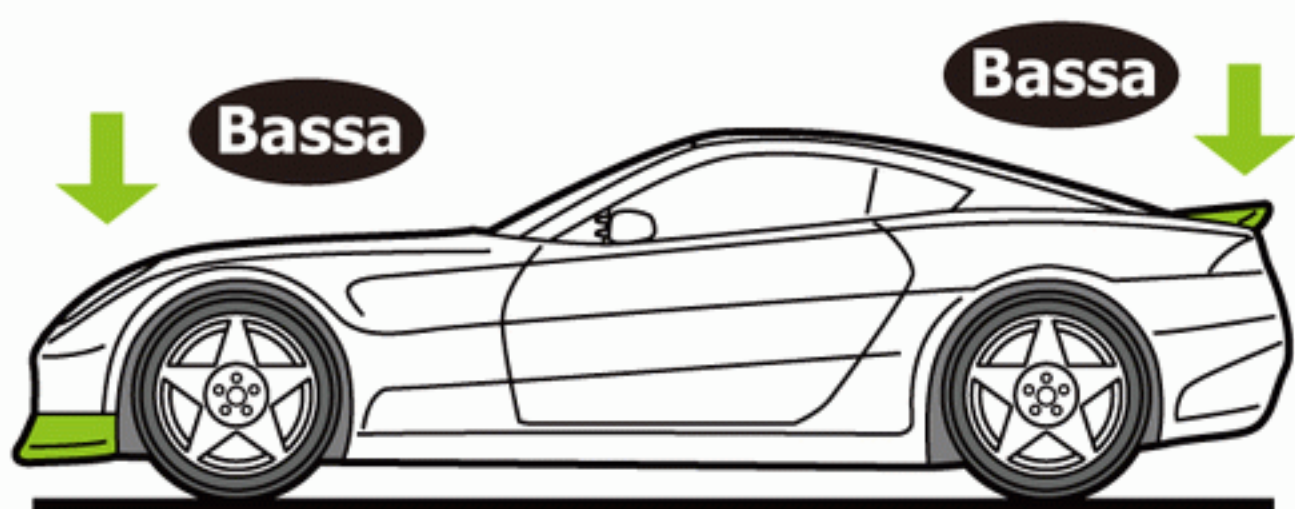
Migliori prestazioni ad alta velocità

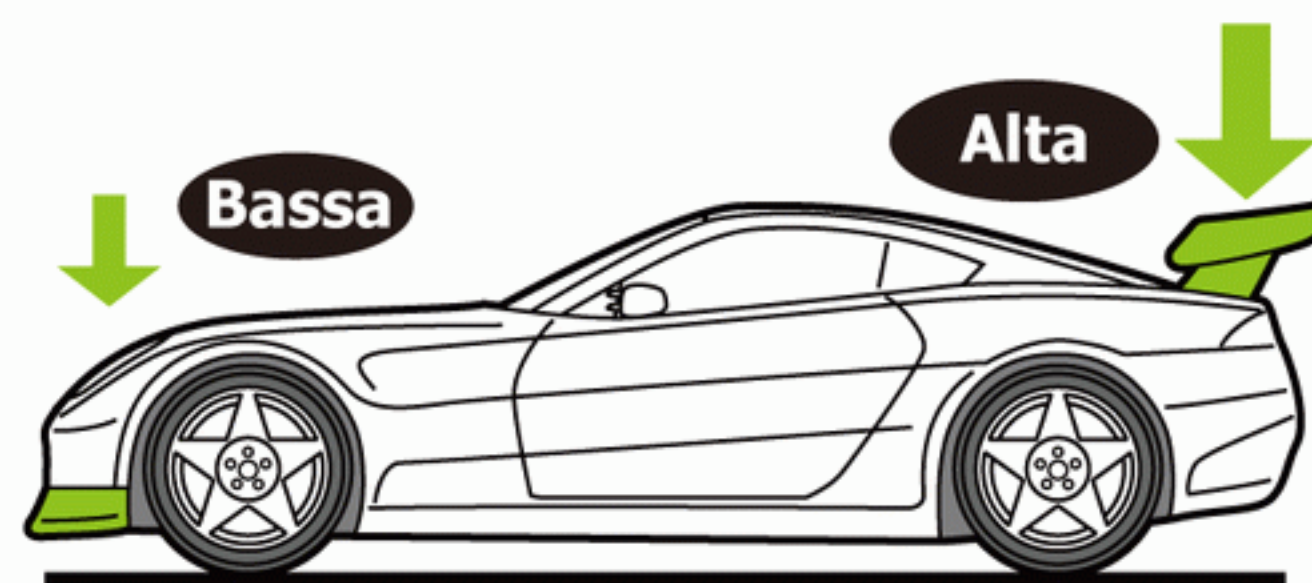
Ad alte velocità è importante considerare gli effetti dell'aria: questi si possono suddividere nella resistenza aerodinamica, che limita la velocità di punta, e nella portanza, che tende a sollevare l'auto da terra. Questi due fattori sono strettamente correlati: aumentando la resistenza cala la portanza e viceversa. Pertanto, è necessario riuscire a trovare una configurazione che assicuri un buon equilibrio tra i due elementi.

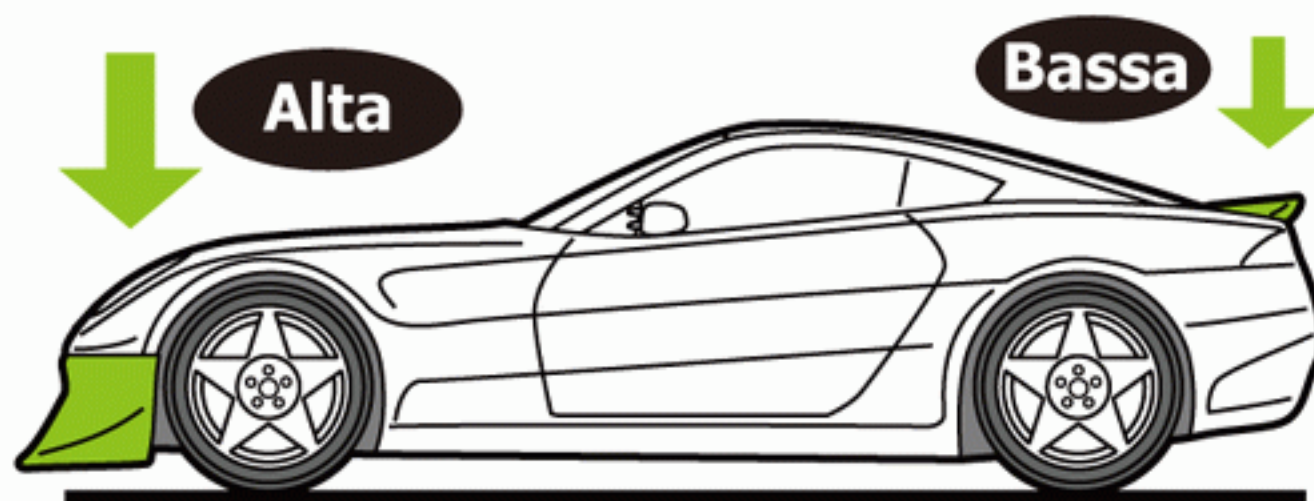
Un aspetto fondamentale dell'aerodinamica ad alte velocità è come sfruttare la deportanza, ovvero la forza esercitata dalla resistenza aerodinamica che preme l'auto verso il suolo e migliora il contatto con il fondo stradale. Una maggiore deportanza riduce la velocità di punta ma aumenta stabilità e velocità in curva, specie su quelle più rapide. Viceversa, una deportanza minore riduce la velocità in curva ma consente alla vettura di procedere più rapidamente in rettilineo.

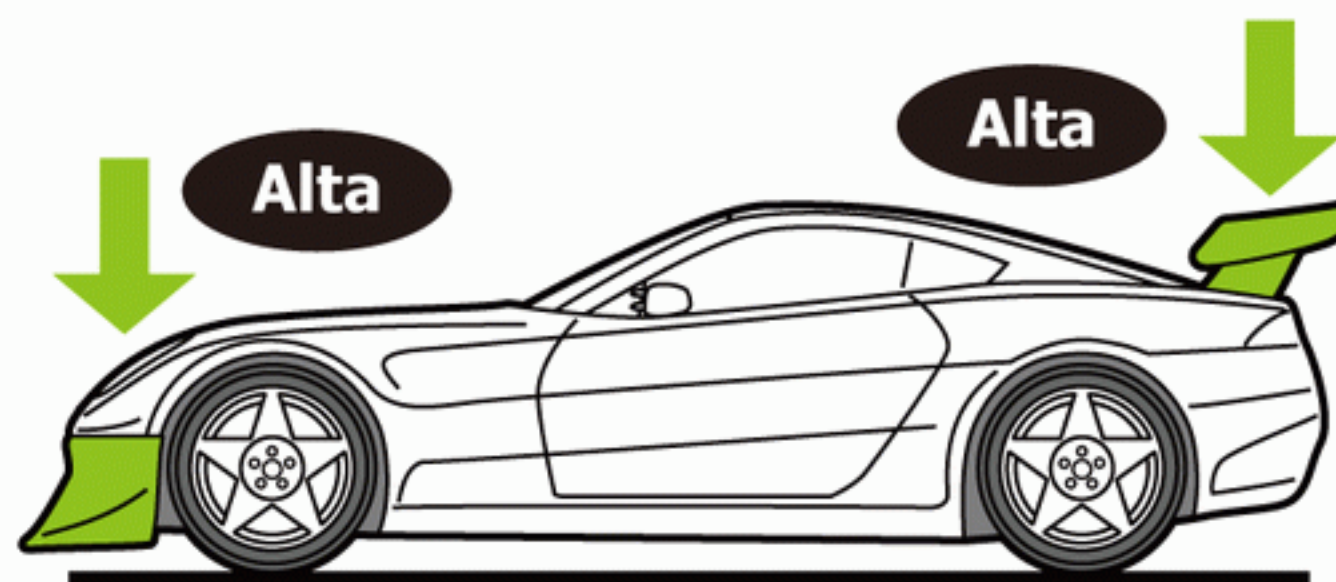
La deportanza, perciò, andrà decisa in base alla natura del tracciato: contrariamente a quanto si potrebbe pensare, valori elevati di carico aerodinamico non sono sempre la migliore soluzione. Il miglior metodo è determinare la deportanza ideale iniziando con il valore minimo possibile e aumentandolo via via, in funzione dell'importanza delle curve più veloci. Nelle auto di piccola cilindrata, peraltro, l'approccio ottimale è ottenere la massima velocità di punta, riducendo la deportanza a zero.

È inoltre possibile modificare la tenuta nelle curve ad alta velocità modificando la deportanza anteriore e posteriore. Una maggiore deportanza anteriore aumenta l'aderenza dell'avantreno e, quindi, il sovrasterzo, mentre una maggiore deportanza posteriore avrà l'effetto opposto, accentuando il sottosterzo. Questo tipo di modifiche all'assetto può fare la differenza su un circuito ad alta velocità.

Bassa / Bassa

La velocità di punta aumenta
Il controllo diminuisce

Bassa / Alta

La velocità di punta diminuisce leggermente
Tendenza al sottosterzo

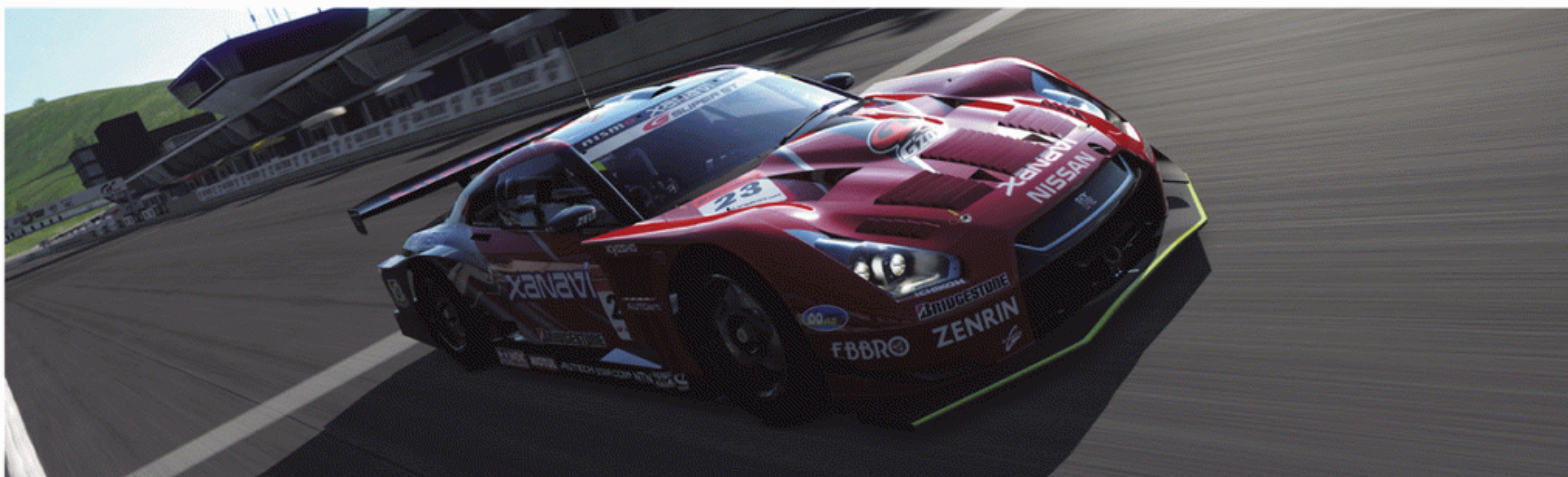
Alta / Bassa

La velocità di punta aumenta leggermente
Tendenza al sovrasterzo

Alta / Alta

La velocità di punta diminuisce
Il controllo aumenta

SITUAZIONI

CAPITOLO 03 Elaborazione e impostazioni

Impostazioni per situazioni specifiche

Regolare le impostazioni dell'auto può essere molto utile per affrontare determinate piste o condizioni specifiche. Pochi rapidi aggiustamenti delle sospensioni e della trasmissione possono fare la differenza.

Piste veloci

Migliorare la velocità massima

Nei circuiti veloci, l'auto deve essere in grado di affrontare le curve alla massima velocità possibile. Le sospensioni e gli ammortizzatori devono essere rigidi e l'assetto basso. Un assetto troppo basso, tuttavia, limita il movimento delle molle e rende le sospensioni troppo rigide per assorbire efficacemente le irregolarità della strada, finendo per prevalere sugli aspetti positivi. La rigidità delle molle può essere compensata allentando le barre stabilizzatrici, in modo da creare un leggero rollio che mantiene le ruote più aderenti alla strada. Al contrario, se si allentano le molle per gestire meglio un fondo stradale irregolare, irrigidire le barre stabilizzatrici aiuta a contrastare un rollio eccessivo. Il concetto di base è di compensare l'azione delle molle con le barre stabilizzatrici.

Un altro fattore importante è l'allineamento delle ruote. Aumentando la convergenza sul posteriore si ottiene una maggiore stabilità. La campanatura deve essere leggermente negativa, ma non troppo, per assicurare un buon contatto delle ruote con il fondo stradale sui rettilinei veloci e nelle frenate brusche.

Per quanto riguarda i rapporti delle marce, la regolazione del cambio deve puntare all'obiettivo usuale: mantenere l'auto nella banda di potenza. La marcia più alta dovrebbe essere impostata in modo da sfiorare il massimo dei giri alla fine dei rettilinei più lunghi. La deportanza deve essere ridotta al minimo necessario, per massimizzare la velocità sui rettilinei, senza però finire per perdere stabilità in curva e in frenata.

Impostazioni consigliate per le sospensioni

		ANTERIORE	POSTERIORE
Altezza dal suolo		Ridotta	Ridotta
Ammortizzatori	Estensione	Alta	Alta
	Compressione	Alta	Alta
Flessibilità delle molle		Rigida	Rigida
Assetto delle ruote	Convergenza	0	Positiva
	Campanatura	Negativa	0
Rigidità delle barre stabilizzatrici		Rigida	Rigida

※ A seconda della vettura, queste impostazioni potrebbero non essere disponibili.

Ottenere la prestazione migliore

Piste tecniche

Trasferire efficacemente la potenza a terra

Nelle piste tecniche con curve strette, l'auto deve essere in grado di sterzare rapidamente ed efficacemente, accelerando in uscita dalla curva con una perdita di potenza minima. Su questi circuiti, l'altezza dal suolo deve essere il più possibile ridotta, evitando tuttavia di esagerare per non incorrere in effetti indesiderati.

Il comportamento in curva più efficace si ottiene con molle morbide sull'anteriore e rigide sul posteriore (senza esagerare, nelle auto a trazione posteriore), oltre ad ammortizzatori opportunamente regolati. L'allineamento delle ruote deve prevedere una leggera convergenza anteriore, se si vuole dare priorità alla risposta in curva, oppure una convergenza minore per assicurare una maggiore facilità di guida al punto di corda e oltre. La campanatura negativa deve essere usata con moderazione, per assicurare trazione in frenata e in curva.

I rapporti del cambio devono essere corti, a beneficio del regime di rotazione piuttosto che della velocità massima. Il rapporto finale deve essere basso per permettere una rapida accelerazione.

Se sono possibili regolazioni approfondite del motore, bisogna puntare a ottenere una coppia massima a velocità basse e medie, per dare maggiore spinta in uscita dalle curve, piuttosto che cercare di raggiungere la potenza massima con un alto numero di giri. Impostando una deportanza elevata sull'anteriore e sul posteriore, si sfrutta l'aerodinamica dell'auto per ottenere stabilità in curva, piuttosto che per ottimizzare la velocità massima.

Impostazioni consigliate per le sospensioni

		ANTERIORE	POSTERIORE
Altezza dal suolo		Ridotta	Elevata
Ammortizzatori	Estensione	Alta	Bassa
	Compressione	Alta	Bassa
Flessibilità delle molle		Rigida	Bassa
Assetto delle ruote	Convergenza	0	Positiva
	Campanatura	0	0
Rigidità delle barre stabilizzatrici		-	-

※ A seconda della vettura, queste impostazioni potrebbero non essere disponibili.

Contrastare il sottosterzo

Cosa fare se l'auto non sterza come dovrebbe

Identificare il problema: il sottosterzo può verificarsi in inserimento di curva, quando ci si avvicina al punto di corda e quando si accelera in uscita dalla curva.

Per ridurre il sottosterzo in inserimento, è necessario aumentare il più possibile l'aderenza dell'avantreno. Ciò si ottiene ammorbidendo le molle della sospensione anteriore, aumentando l'estensione dell'ammortizzatore e riducendone la compressione, in modo da spostare il carico verso la parte anteriore dell'auto.

Il sottosterzo in entrata può essere causato anche da un differenziale autobloccante eccessivamente sensibile. Ridurre il fattore di blocco e la coppia iniziale può aiutare a risolvere il problema. Se si usa un differenziale a 2 vie, che funziona anche quando non si preme l'acceleratore, in un'auto a trazione posteriore si può provare a sostituirlo con un sistema a 1 via, che non si attiva quando si decelera. In circuiti con curve veloci può essere utile anche aumentare la deportanza anteriore per incrementare l'aderenza delle ruote anteriori.

Se l'auto va in sottosterzo quando ci si avvicina al punto di corda, è possibile aumentare il valore della campanatura negativa per ottenere maggiore aderenza delle ruote. Può essere utile anche ridurre la convergenza sul posteriore e, se possibile, aumentare la larghezza della carreggiata dell'avantreno.

Per ridurre il sottosterzo nelle auto a trazione posteriore, quando si accelera all'uscita dalle curve, è possibile diminuire l'altezza dal suolo all'avantreno, aumentando lo smorzamento nell'estensione degli ammortizzatori anteriori e riducendolo nella compressione di quelli posteriori. Nelle auto FF, questo tipo di sottosterzo può essere ridotto con un maggiore intervento del differenziale autobloccante.

Impostazioni consigliate per le sospensioni

		ANTERIORE	POSTERIORE
Altezza dal suolo		Ridotta	Elevata
Ammortizzatori	Estensione	Alta	Alta
	Compressione	Bassa	Alta
Flessibilità delle molle		Bassa	Rigida
Assetto delle ruote	Convergenza	Positiva	0
	Campanatura	Negativa	0
Rigidità delle barre stabilizzatrici		Bassa	Rigida

※ A seconda della vettura, queste impostazioni potrebbero non essere disponibili.

Contattare il sovrasterzo

Il problema delle auto a trazione posteriore

Le vetture FF e 4WD sono poco soggette al sovrasterzo, che si verifica soprattutto nelle auto a trazione posteriore.

Se si desidera solo mantenere il massimo controllo del retrotreno, ad esempio per le gare di derapata, può essere utile irrigidire le sospensioni anteriori e posteriori, per gestire meglio la deriva del posteriore. Nelle prove a tempo o su tracciati veloci, invece, è importante mantenere la trazione affinché l'auto avanzi speditamente.

Il sovrasterzo causa la perdita di trazione sulle ruote posteriori quando si accelera, disperdendo parte della potenza in un movimento laterale, piuttosto che rettilineo.

Ciò può essere contrastato regolando molle e ammortizzatori. Le molle posteriori devono essere ammorbidite, mentre la forza degli ammortizzatori deve essere ridotta in compressione e aumentata in estensione. Ridurre la rigidità della barra stabilizzatrice posteriore favorisce lo spostamento del carico sulla ruota interna. Se possibile, è utile aumentare la carreggiata del retrotreno. Se le sospensioni anteriori sono troppo morbide, il peso può spostarsi in avanti troppo facilmente: occorre quindi aumentare la rigidità anteriore per ottenere maggiore aderenza del retrotreno.

Se l'auto ha un alettone posteriore, aumentarne l'inclinazione produce una maggiore deportanza, ma riduce leggermente la velocità massima.

Impostazioni consigliate per le sospensioni

		ANTERIORE	POSTERIORE
Altezza dal suolo		Elevata	Ridotta
Ammortizzatori	Estensione	Alta	Alta
	Contrazione	Alta	Bassa
Flessibilità delle molle		Rigida	Bassa
Assetto delle ruote	Convergenza	-	Positiva
	Campanatura	-	Negativa
Rigidità delle barre stabilizzatrici		-	Bassa

※ A seconda della vettura, queste impostazioni potrebbero non essere disponibili.

Guida sul bagnato

Sfruttare al meglio gli pneumatici

Quando piove, il coefficiente di attrito del fondo stradale (μ) si abbassa, riducendo l'aderenza delle ruote. Alcune regolazioni consentono di ottenere prestazioni migliori sul bagnato.

Il fondo stradale bagnato richiede flessibilità delle molle, smorzamento e rigidità delle barre stabilizzatrici inferiori e, in alcuni casi, si può eliminare del tutto la barra stabilizzatrice posteriore. Le sospensioni rigide, ideali per una buona presa sull'asciutto, compromettono l'aderenza sul bagnato e possono provocare slittamenti improvvisi. La campanatura deve essere leggermente ridotta, rispetto alle condizioni asciutte, per assicurare maggiore aderenza alle gomme in accelerazione e decelerazione. Nelle auto che prevedono regolazioni aerodinamiche si può aumentare la deportanza anteriore e posteriore, al fine di ottenere l'aderenza massima.

Uno degli accorgimenti più semplici da attuare sul bagnato consiste nel regolare la pressione degli pneumatici. Con pioggia battente, è utile aumentare la pressione per limitare l'area della ruota a contatto con la strada e aumentare il carico su di essa, limitando così il rischio di aquaplaning. In caso di pioggia leggera, invece, si hanno prestazioni migliori riducendo la pressione. La modifica della pressione di pneumatici anteriori e posteriori è un modo rapido e semplice per mettere a punto l'aderenza ed è di solito una delle prime operazioni a essere attuata.

Se sono possibili regolazioni approfondite del motore, le migliori prestazioni si ottengono con una coppia bassa e media, piuttosto che con una potenza elevata. Inoltre, ausili elettronici come l'ABS possono dare un contributo prezioso: la loro presenza in fase di guida sul bagnato si avverte immediatamente.

Impostazioni consigliate per le sospensioni

		ANTERIORE	POSTERIORE
Altezza dal suolo		Ridotta	Ridotta
Ammortizzatori	Estensione	Bassa	Bassa
	Compressione	Bassa	Bassa
Flessibilità delle molle		Bassa	Bassa
Assetto delle ruote	Convergenza	Positiva	Positiva
	Campanatura	Negativa	Negativa
Rigidità delle barre stabilizzatrici		Bassa	Bassa

※ A seconda della vettura, queste impostazioni potrebbero non essere disponibili.

Sterrato

Migliorare il controllo

Quando si guida sullo sterrato, l'obiettivo massimo dev'essere quello di assicurare il massimo controllo sull'auto, per reagire prontamente ai cambiamenti improvvisi delle condizioni del terreno e del coefficiente di attrito, che si verificano non appena l'auto cambia lentamente la propria traiettoria. Le vetture, inoltre, sollevano sabbia, polvere e ghiaia mentre procedono, andando a cambiare le condizioni del fondo stradale per quelle che le seguono. Un'auto ottimizzata soltanto per la prestazione potrebbe non essere in grado di affrontare al meglio queste sfide.

Una vettura efficace su questo tipo di superficie dovrebbe entrare facilmente in curva quando si rilascia l'acceleratore, ma mantenere un comportamento neutro (senza sovrasterzo o sottosterzo) quando si accelera. In questo modo, con un assetto da "sovrasterzo", è possibile controllare in parte le curve utilizzando l'acceleratore. Questo comportamento può essere ottenuto usando un differenziale a 2 vie e bilanciando la potenza frenante fra avantreno e retrotreno.

I metodi per contrastare sottosterzo e sovrasterzo sulle superfici sterrate sono analoghi a quelli usati sull'asfalto. Se l'assetto ribassato è sempre preferibile, eventuali pietre e asperità del terreno potrebbero danneggiare l'auto. Se la pista prevede dei salti, l'aerodinamica deve essere regolata in modo da garantire stabilità in aria. Il motore deve essere regolato puntando a una pronta risposta, piuttosto che alla potenza massima.

In generale, le tecniche di guida per raggiungere una velocità soddisfacente sullo sterrato sono equivalenti a quelle su pista.

Impostazioni consigliate per le sospensioni

		ANTERIORE	POSTERIORE
Altezza dal suolo		Elevata	Elevata
Ammortizzatori	Estensione	Alta	Alta
	Compressione	Alta	Alta
Flessibilità delle molle		Bassa	Bassa
Assetto delle ruote	Convergenza	Positiva	0
	Campanatura	Negativa	Negativa
Rigidità delle barre stabilizzatrici		Bassa	Bassa

※ A seconda della vettura, queste impostazioni potrebbero non essere disponibili.

Continua a pag. 194...

Riferimento ai percorsi

4

Ascari - Percorso completo | Spagna

N

4 Inclinazione Daytona 17°, Daytona

3 Eau Rouge, Spa-Francorchamps

1 Rettilineo di partenza

2 Curva Copse, Silverstone

Nella realizzazione del circuito si è posta la massima cura nel rispetto del paesaggio. I cordoli usano colori naturali, per esempio, invece dei classici rosso e bianco.

Lunghezza della pista: 5.425 m	Cambio di quota: 38,56 m	Rettilineo più lungo: 470 m	Numero di curve: 26

40
0
-40

Ascari - Percorso completo

Il tracciato più lungo di Spagna, con diverse curve impegnative.

Il tracciato è dedicato al leggendario Alberto Ascari, grande campione di F1. Rappresenta l'elemento principale dell'Ascari Race Resort, una struttura interamente dedicata agli appassionati dell'automobilismo, situata a dieci minuti dal centro di Ronda, antica città nella regione meridionale della Spagna, famosa per la sua Plaza de toros. Le sue ventisei curve sono divise in tredici svolte a destra e tredici svolte a sinistra, per cui si tratta di un tracciato molto equilibrato e di natura piuttosto tecnica. La conformazione della pista offre curve simili alla "Eau Rouge" di Spa e alla "Copse" di Silverstone.

info Un resort automobilistico, pensato per gli amanti delle auto.

Come indica il nome stesso, "Race Resort", l'idea alla base di questa struttura, la differenzia dagli altri circuiti. Per preservare la bellezza del territorio non ci sono edifici alti, come torri di controllo. Al momento non ospita gare di campionato e l'accesso è riservato ai membri. L'esclusività del luogo lo rende perfetto per sessioni di prove ed eventi organizzati dalle case automobilistiche.

Le pareti esterne delle strutture del resort sono interamente bianche, per rispettare lo stile delle costruzioni dell'Europa meridionale. Accanto al ristorante si trova una piscina, da cui si gode la vista dell'intero tracciato. Qui è possibile vivere un'esperienza automobilistica diversa da quella offerta da qualunque altro circuito.

ACCESSO

Dall'aeroporto di Siviglia, attraversa la città e dirigiti a sud lungo la A-376, la A-375, la A-384 e la A367 fino a raggiungere Ronda. Il tracciato si trova a dieci minuti da Ronda e il viaggio richiede circa un'ora e mezza in totale. Il resort è raggiungibile anche dall'aeroporto di Gibilterra.

Legenda

1	Rettilineo di partenza	Il rettilineo lungo cui è situato il traguardo. Si conclude con una chicane.
2	Curva Copse, Silverstone	Questa sezione porta lo stesso nome della famosa curva di Silverstone. Anche se non è una sua esatta replica, le sue caratteristiche di curva ad alta velocità sono identiche.
3	Eau Rouge, Spa-Francorchamps	Una serie ritmica di curve, con saliscendi. Questa sezione ricorda molto la "Eau Rouge" di Spa-Francorchamps.
4	Inclinazione Daytona 17°, Daytona	Questo tratto a velocità elevata è ispirato alla sezione inclinata di Daytona, caratterizzata dall'incredibile pendenza di 17°.

Brands Hatch | Regno Unito

N

7 | Rettilineo Brabham

1 | Curva Paddock Hill

2 | Curva Druids

6 | Curva Clark

3 | Hawthorn Hill

5 | Curva Stirling

4 | Dingle Dell

Indy Circuit

GP Circuit

Lunghezza della pista: 3.916 m	Cambio di quota: 35 m	Rettilineo più lungo: 475 m	Numero di curve: 9

*I dati fanno riferimento al GP Circuit

30

0

-30

Brands Hatch

Un percorso tecnico dalla storia prestigiosa, con superficie molto ondulata.

Situato nel Kent, circa 30 km a sud-est di Londra, Brands Hatch è adagiato nel verde della campagna inglese. Qui si disputano eventi motoristici fin dal 1950: si tratta di un tracciato impegnativo e veloce, con difficili curve medie e veloci, parecchi saliscendi e una larghezza ridotta. Sono presenti due configurazioni: il GP Circuit, che si snoda nel cuore della foresta, e l'Indy Circuit, che prende una scorciatoia tagliando dalla curva 4, la "Surtees", all'ultima curva, la "Clark Curve".

info Per i tifosi della terra d'Albione, questo è il "cuore" dell'automobilismo britannico.

Ogni tratto di Brands Hatch rende omaggio ai più famosi piloti britannici: una scelta appropriata, visto il ruolo giocato da questa pista nella storia degli sport motoristici inglesi. Qui si sono combattute famose battaglie e, per molti piloti, questo è ancora oggi il tracciato di casa.

Nei periodi di gara, l'area della curva Paddock Hill è dedicata all'hospitality, ma negli altri periodi è gremita da piloti locali, giovani e meno giovani, a testimonianza dell'universalità dell'amore per le auto, che non conosce limiti di età.

ACCESSO

Inghilterra

Bristol

Londra

Francia

Il viaggio da Victoria Station (Londra) a Swanley Station dura all'incirca un'ora. La distanza dal centro di Swanley al tracciato è di 8 km e si può coprire comodamente in autobus o taxi.

Legenda

1	Curva Paddock Hill	Il rettilineo Brabham Straight inizia in salita, per poi scendere nella prima curva. Questa sezione richiede abilità e coraggio.
2	Curva Druids	Questo tornante si trova dopo la discesa dalla collina e la risalita dopo la prima curva. Non offre alcuna visibilità, per questo si verificano spesso degli incidenti.
3	Hawthorn Hill	Un rettilineo in discesa attraverso la foresta, che rappresenta il punto più adatto dove tentare un sorpasso.
4	Dingle Dell	Curva estremamente veloce e difficile da dominare, in quanto l'uscita è cieca e non è facile trovare il punto di corda.
5	Curva Stirling	Questa sezione è dedicata al leggendario pilota Stirling Moss. Una volta superata, si arriva in vista dell'uscita dalla foresta.
6	Curva Clark	L'ultima curva piega decisa a destra. Dato che la quota varia fra ingresso e uscita, è importante percorrerla con la marcia giusta.
7	Rettilineo Brabham	Il rettilineo del traguardo. La sua caratteristica è di essere inclinato in direzione dei box.

Circuit de Spa-Francorchamps | Belgio

N

1 La Source

2 Eau Rouge

3 Rettilineo Kemmel

4 Les Combes

5 Pouhon

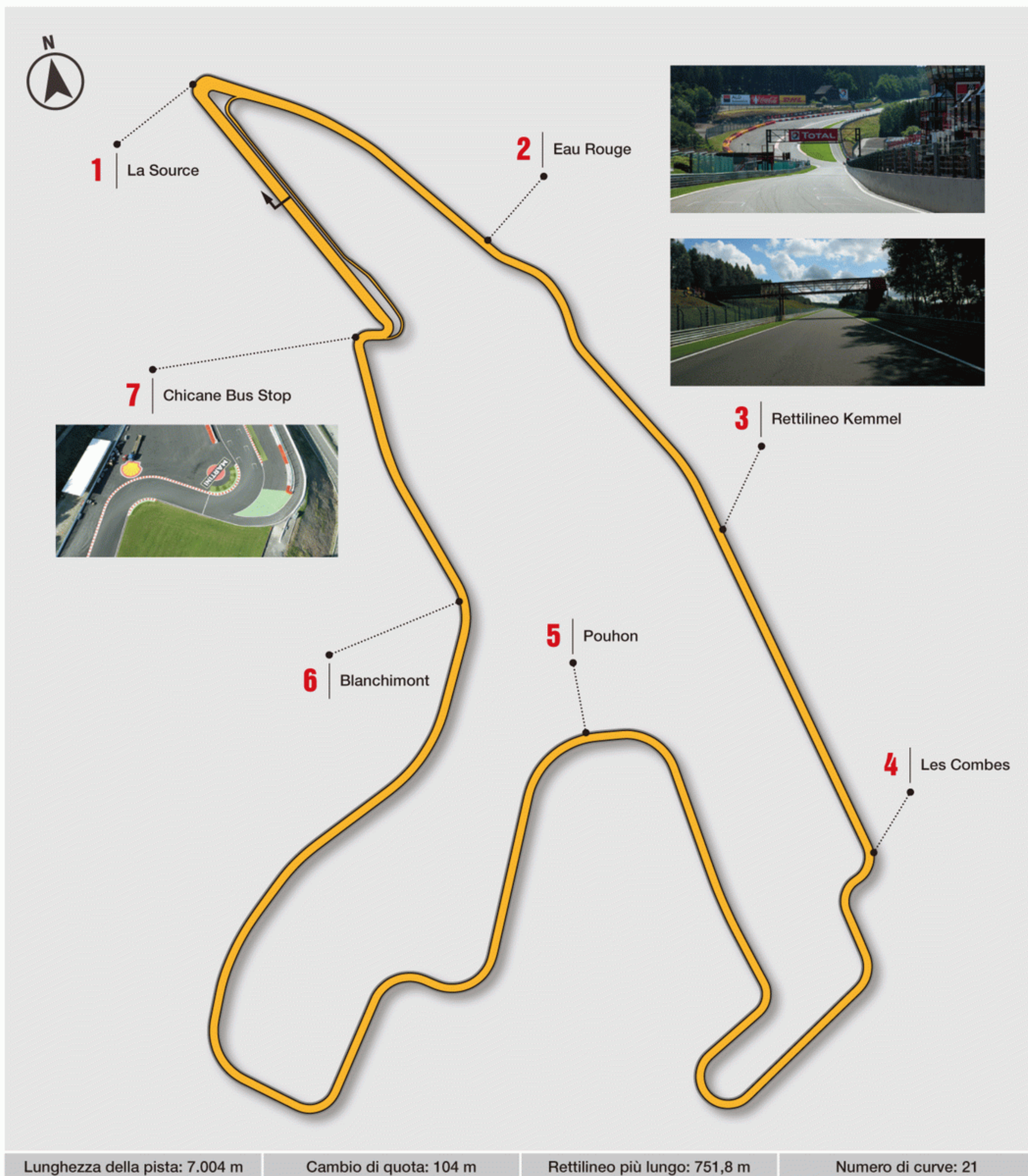
6 Blanchimont

7 Chicane Bus Stop

Lunghezza della pista: 7.004 m	Cambio di quota: 104 m	Rettilineo più lungo: 751,8 m	Numero di curve: 21

60

0

-60

Circuit de Spa-Francorchamps

Circuito spettacolare e tecnico, con variazioni di quota estremamente pronunciate.

Il famoso, veloce e tecnico circuito di Spa-Francorchamps è situato nelle Ardenne, in Belgio, al confine con la Germania. Il tracciato è noto per i lunghi rettilinei con l'acceleratore a fondo corsa e per le curve medie e veloci, che salgono e scendono dalle colline, con cambi di quota fino a 104 m. La famosa Eau Rouge, vera icona di Spa, è una collina molto ripida. Le notevoli variazioni di quota creano condizioni meteo instabili, tanto che spesso si parla di "tempo di Spa". Per riuscire a vincere qui servono abilità e fortuna in egual misura.

info Attorno a questo tracciato si estende un ambiente meraviglioso.

Uno degli aspetti più affascinanti di Spa-Francorchamps è l'ambiente montano nel quale si trova il circuito. Come indica il nome, nelle città vicine si trovano molte terme, che attirano turisti dall'intera Europa. A soli quindici minuti di guida dal tracciato, ci si imbatte nello spettacolare panorama delle Hautes Fagnes, completamente diverso dalla foresta delle Ardenne.

I terreni acquitrinosi delle Hautes Fagnes sono il risultato dell'azione di antichi ghiacciai. L'area è una riserva naturale e ospita al suo interno il punto più elevato del territorio del Belgio. Quando l'aria è limpida, da qui si possono vedere la Germania e i Paesi Bassi.

ACCESSO

Amsterdam
Paesi Bassi
Londra
Colonia
Bruxelles
Germania
Belgio
Francia

Spa si trova a 1,5 ore di treno dalla stazione di Bruxelles o di autobus dalla stazione centrale di Verviers. Un'altra opzione è arrivare in auto, per godere dello splendido panorama. Infine, vista la vicinanza alla Germania, il tracciato è raggiungibile anche da Francoforte.

Legenda

1	La Source	Il primo ostacolo è questo stretto tornante. L'area di frenata arriva improvvisa subito dopo il traguardo. Qui spesso avvengono dei sorpassi.
2	Eau Rouge	La famosa sequenza sinistra-destra-sinistra di Spa, a elevato numero di G, seguita da una ripida salita.
3	Rettilineo Kemmel	Il rettilineo più lungo del tracciato. La velocità che si raggiunge dipende da come si è riusciti a superare la Eau Rouge.
4	Les Combes	Qui si trova il punto più elevato del tracciato: subito dopo la pista si snoda in discesa, con curve medie e veloci.
5	Pouhon	Una curva a velocità elevata, seguita da un tratto in discesa. La chiave è trovare i punti di corda delle diverse curve.
6	Blanchimont	Questo tratto ad alta velocità inizia all'uscita delle curve Paul Frère. Come alla Eau Rouge, qui il coraggio del pilota viene messo a dura prova.
7	Chicane Bus Stop	Questa chicane costringe a rallentare ancor più della Source. Le staccate sono spesso all'ultimo istante ed è teatro di numerosi sorpassi.

Goodwood Hill Climb | Regno Unito

N

Dopo questo varco, la via di fuga... non esiste. Qui servono coraggio e abilità per riuscire a passare.

2 Curva Molecomb

3 Flint Wall

1 Rettilineo del parco

Lunghezza della pista: 1.867 m	Cambio di quota: 92,7 m	Rettilineo più lungo: 360 m	Numero di curve: 9

150
75
0

Goodwood Hill Climb

La prova a tempo più affascinante del mondo intero.

A luglio, ogni anno, l'Inghilterra ospita un grandioso festival dell'automobilismo, il Goodwood Festival of Speed. L'evento principale è una famosa corsa in salita, sulla proprietà del Conte di March. Il tracciato, di circa 1,9 km, è delimitato da balle di fieno alla vecchia maniera e si snoda nel giardino della proprietà, per poi proseguire in un vasto pascolo. Semplice nella conformazione, è comunque difficile da affrontare per via della larghezza ridotta. Il record del percorso, ottenuto nel 1999 da Nick Heidfeld con una McLaren MP4-13, è 41,6 secondi.

info Un festival motoristico per tutte le età.

Molti pensano che questo festival sia riservato solo a ospiti selezionati, ma la verità è che chiunque può recarsi al Goodwood Festival of Speed semplicemente acquistando un biglietto. Spesso si vedono intere famiglie con cestini per picnic e sedie pieghevoli, intente a godersi la giornata. E, visto che qui si trovano anche molti piloti famosi, è possibile imbattersi per caso nel proprio idolo mentre si fa una passeggiata.

Le case automobilistiche mettono in mostra nuovi modelli e vetture storiche, ma a volte si trovano anche stramberie come questa: questo "letto" è, in realtà, un'automobile omologata per la circolazione su strade pubbliche.

ACCESSO

Da Victoria Station (Londra) a Chichester Station occorrono 90 minuti di viaggio, con un cambio. Durante gli eventi, sono previsti autobus navetta dalla stazione alla proprietà Goodwood: dal terminal bastano pochi minuti a piedi per raggiungere il tracciato.

Legenda

1	Rettilineo del parco	Goodwood House è visibile dalla linea di partenza, oltre gli alberi che costeggiano il rettilineo.
2	Curva Molecomb	Questa curva a sinistra in fondo al rettilineo è graduale, ma piuttosto stretta come sede stradale e praticamente senza via di fuga. Qui osa solo chi ha coraggio da vendere.
3	Flint Wall	In questo tratto ci sono curve a sinistra e a destra, simili a una chicane. La presenza di un muretto in mattoni toglie qualsiasi visibilità.

Cervino | Svizzera

Rotenboden curva 7

3 | Dristelen curva 1

1 | Rotenboden curva 7

2 | Riffelsee curva 2

Rotenboden
Riffelsee
Dristelen
Circuito corto

Lunghezza della pista: 3.577,8 m	Cambio di quota: 236 m	Rettilineo più lungo: 415 m	Numero di curve: 15

*I dati fanno riferimento alla configurazione più lunga della configurazione A

160
0
-160

Cervino

Un percorso che si snoda su maestose montagne alte 4.000 metri.

Le maestose Alpi svizzere e l'ardito picco del Cervino, che svetta a 4.478 metri, fanno da sfondo a questo tracciato originale, situato nei pressi della famosa stazione del Gornergrat. Il percorso è composto da una lunga sezione da percorrere in pieno e da curve molto veloci, che lo rendono piuttosto tecnico. Anche i passaggi dai tratti veloci a quelli medi e lenti sono degni di nota. La sede stradale è ampia, ma dato che si gareggia in montagna non mancano curve cieche e pendenze accentuate: si tratta di una sfida unica, molto diversa da quella di un normale tracciato stradale.

info Una spettacolare vista del mondo oltre il limite degli alberi.

Il percorso si trova nell'area di Riffelberg e Rotenboden, situata al di sopra dei 2.500 metri di quota e tappa obbligata degli escursionisti desiderosi di scoprire il cuore delle Alpi. Su queste montagne lo sci la fa da padrone d'inverno, mentre in primavera e in estate si possono scoprire bellezze naturali quali la stella alpina, gli animali selvatici e gli sconfinati panorami.

La Gornergrat Bahn parte da Zermatt e, in circa 30 minuti, raggiunge il Gornergrat, coprendo un dislivello di 1.400 metri. Non appena usciti dalla foresta, prima di giungere a Riffelberg, si può ammirare il maestoso panorama della regione circostante.

ACCESSO

Zurigo
Svizzera
Ginevra
Milano
Torino
Francia
Italia

Dall'aeroporto internazionale Cointrin di Ginevra, come pure dall'aeroporto di Zurigo, servono circa quattro ore per raggiungere la stazione di Zermatt, da dove parte la Gornergrat Bahn. Il tempo di viaggio fino a Riffelberg è di venti minuti. Attenzione: a Zermatt è vietato l'accesso ai veicoli con motori a combustione interna.

Legenda

1	Rotenboden curva 7	Questa sezione in discesa si trova nei pressi della stazione di Rotenboden. Ci sono molte curve strette, con una svolta ad alta velocità nel mezzo per mantenere elevata l'attenzione.
2	Riffelsee curva 2	Alla fine del tratto in discesa dovrai affrontare una salita molto ripida in direzione di Riffelberg.
3	Dristelen curva 1	Questa curva ad alta velocità ti conduce verso il Cervino. Il segreto qui è sfruttare l'inclinazione, senza lasciarsi distrarre dal panorama.

Mount Panorama Motor Racing Circuit | Australia

1 Curva Hell

2 Rettilineo Mountain

3 Brock's Skyline

4 Dipper

5 Forrest's Elbow

6 Rettilineo Conrod

7 Chase

Lunghezza della pista: 6.213 m	Cambio di quota: 174 m	Rettilineo più lungo: 1.916 m	Numero di curve: 23

Mount Panorama Motor Racing Circuit

Un famoso circuito australiano che si snoda lungo strade pubbliche.

A Bathurst, nel Nuovo Galles del Sud, in Australia, si trova il Mount Panorama Motor Racing Circuit, famoso per la "Bathurst 1000" e per altri eventi popolari. La caratteristica di questo tracciato è di utilizzare strade pubbliche, che salgono e scendono dalle colline. Anche se la parte iniziale e quella finale si percorrono in pieno, gli altri tratti di pista sono ricchi di saliscendi e curve cieche: sono proprio le caratteristiche peculiari di questo circuito a renderlo così affascinante.

info Scopri i panorami più belli di Bathurst.

Come indica il nome stesso della pista, da qui si possono ammirare splendidi panorami montani. Le strade sono normalmente aperte al traffico e sono utilizzate anche per camminare e fare jogging dai residenti. Se passi da queste parti, ricorda che il limite di velocità è di 60 km/h: la polizia è sempre pronta a sanzionare chi esagera con l'acceleratore.

La zona nei pressi di Brock's Skyline è molto apprezzata, dato che consente di godere di una splendida vista della città di Bathurst. Durante il giorno è piuttosto frequentata, ma i panorami notturni sono particolarmente degni di nota: in molti guidano fin qui per ammirare il tramonto e il calare dell'oscurità.

ACCESSO

Australia

Sydney

Melbourne

Tasmania

Nuova Zelanda

Bathurst è situata all'incirca a 200 km a ovest di Sydney e si raggiunge percorrendo per circa tre ore la Barrier Highway (Route A-32). Esiste anche un collegamento aereo con la Regional Express, che copre la tratta in 50 minuti di volo da Sydney.

Legenda

1	Curva Hell	Questa curva a sinistra si trova subito dopo il traguardo. Dato che si tratta di una strada pubblica, presenta una configurazione piuttosto secca.
2	Rettilineo Mountain	Nella prima parte del tracciato si trova questo lungo rettilineo da percorrere in pieno. Come indica anche il suo nome, porta verso il fianco della montagna.
3	Brock's Skyline	Un tratto di pista dedicato al leggendario pilota Peter Brock. Il panorama che si può ammirare sulla destra è spettacolare.
4	Dipper	Questo è il tratto di pista più difficile: una serie di curve cieche e una sede stradale stretta richiamano alla mente il Nürburgring.
5	Forrest's Elbow	La fine del tratto collinare del tracciato presenta una curva che ricorda l'incidente del motociclista Jack Forrest.
6	Rettilineo Conrod	Questo lungo rettilineo scende da una collina e presenta molte ondulazioni. Le velocità massime superano facilmente i 300 km/h.
7	Chase	Questa chicane, realizzata per il World Touring Car Championship del 1987, riduce notevolmente la velocità dei veicoli in avvicinamento all'ultima curva.

Silverstone Circuit | Regno Unito

N

3 Curva Copse

2 Rettilineo Wellington

1 Rettilineo International Pits

7 Club

4 Curva Maggotts ~ Becketts ~ Chapel

6 Stowe

5 Rettilineo Hanger

WWW.SILVERSTONE.CO.UK

National Circuit
International Circuit
GP Circuit

Lunghezza della pista: 5.891 m	Cambio di quota: 11,34 m	Rettilineo più lungo: 789 m	Numero di curve: 18

*I dati fanno riferimento al più lungo GP Circuit

15
0
-15

Silverstone Circuit

Un circuito tradizionale, con una storia lunga più di 65 anni.

Il Silverstone Circuit è stato inaugurato nel 1948 nell'area di un ex aeroporto della Royal Air Force. Nel 1950, vi si è svolto il primo Gran Premio di F1, il GP d'Inghilterra: da allora, questa pista è stata considerata la culla dello sport automobilistico. Ai giorni nostri, nonostante le numerose modifiche apportate al tracciato per renderlo più tecnico, Silverstone rimane famoso come circuito ad alta velocità. Nel gioco sono presenti tre configurazioni: il National Circuit sulla sezione nord, l'International Circuit sulla sezione sud e il Grand Prix Circuit, che le utilizza entrambe.

info Silverstone, il luogo dove reale e virtuale si toccano.

Fin dalla creazione del programma GT Academy, Silverstone ha ospitato la fase di selezione finale, nella quale il miglior giocatore di Gran Turismo ha la possibilità di diventare un pilota professionista. Sono già passati sei anni dalla prima edizione della competizione, nel 2008, e da allora Silverstone è divenuto un nome mitico anche per i giocatori di Gran Turismo, oltre che per i piloti.

Silverstone, durante le finali di GT Academy. Oltre alle tecniche di guida, vengono valutati molti altri aspetti dei potenziali piloti, fra i quali la preparazione fisica, le capacità di leadership, la dimestichezza nella comunicazione e, ovviamente, l'abilità al volante.

ACCESSO

Manchester
Inghilterra
Bristol
Londra

Prendi il treno da Euston Station a Northampton Station, per un viaggio di un'ora circa, seguito da circa 30 minuti di taxi. Ricorda che, durante la settimana della gara, il traffico attorno a Silverstone è molto intenso, per cui calcola bene i tempi necessari per raggiungere l'autodromo.

Legenda

1	Rettilineo International Pits	Dopo le modifiche del tracciato, questo è diventato il rettilineo del traguardo. Da qui si vede il nuovo paddock dell'hospitality, il "Silverstone Wing".
2	Rettilineo Wellington	Questo nuovo rettilineo è il risultato delle migliorie apportate al tracciato. Si chiude con una curva secca, perfetta per tentare il sorpasso.
3	Curva Copse	Con i cambiamenti della traiettoria, questa curva super veloce lo è diventata ancora di più in ingresso. I piloti devono riuscire a superarla senza alzare il piede.
4	Curva Maggotts_Becketts_Chapel	Questa serie di curve a S è il punto dove si può conquistare la vittoria a Silverstone. Ci sono pochi tratti di pista più difficili al mondo.
5	Rettilineo Hanger	Il rettilineo più lungo di Silverstone è lungo circa 800 metri. La sede stradale è molto ampia, cosa che rende possibili tentativi di sorpasso aggressivi.
6	Stowe	Un tratto simile alla curva Copse, con un lungo rettilineo dopo la curva: qui, però, è necessario rallentare. Trovare il punto di corda non è facile, quindi serve molta pazienza.
7	Club	Questa curva cieca ha una lieve pendenza inversa. A seguito dei lavori di modifica del tracciato, è diventata l'ultima curva.

Twin Ring Motegi Road Course | Giappone

1 Rettilineo principale

3 Primo sottopasso

7 Curva Victory

2 Curva quattro

4 Curva S

6 Rettilineo in discesa

5 Tornante

Circuito Ovest
Circuito Est
Road Course

Lunghezza della pista: 4.801 m	Cambio di quota: 30,4 m	Rettilineo più lungo: 762 m	Numero di curve: 14

*I dati fanno riferimento alla configurazione più lunga del Road Course

30
0
-30

Twin Ring Motegi Road Course

Il secondo autodromo internazionale Honda.

Twin Ring Motegi Road Course è un tracciato conforme alle norme internazionali, realizzato nel 1997 da Honda. Questo tracciato stradale, di stile europeo, controlla la velocità con molte frenate e altrettante accelerazioni ed è nettamente diverso dall'altro tracciato Honda, il Suzuka Circuit. Utilizzando i passaggi di collegamento si ottengono tre configurazioni: Circuito Est, Circuito Ovest e Road Course, la più lunga. La parte più famosa del circuito è il rettilineo in discesa, che scende verso una curva a 90 gradi: qui, per eccellere, bisogna essere dei maestri della frenata.

info Un messaggio dagli sport motoristici alle vittime del terremoto di Sendai del 2011.

Il terremoto di Sendai del 2001 è ancora vivo nella memoria di tutti. Fra gli autodromi giapponesi, questo è quello più vicino al luogo del disastro e ha subito diversi danni a causa delle scosse. In meno di un anno, però, tutto è tornato come nuovo: al suono dello slogan "Let's Go! Japan", Motegi è tornato in attività. Da allora, qui si svolgono con regolarità degli eventi per favorire il recupero della zona, tanto che il circuito è diventato il simbolo della determinazione giapponese nel superare la catastrofe.

Uno slogan appeso sopra la linea di controllo del percorso stradale recita がんばろう! 日本, che significa "Let's go! Japan", in riferimento al terremoto di Sendai. In un circuito situato vicino all'epicentro del disastro, queste parole hanno infuso coraggio e speranza a tutti gli appassionati di automobilismo giapponesi.

ACCESSO

Giappone
Tsukuba
Tokyo
Choshi

Partendo da Tokyo, il modo più comodo per raggiungere Motegi è prendere lo shinkansen fino a Utsunomiya, per circa 50 minuti. Da lì occorrono altri 90 minuti in autobus. Potresti fare prima in taxi, ma così spenderesti molto di più. Durante i periodi di gara il traffico è molto intenso: tienine conto quando pianifichi i tuoi spostamenti.

Legenda

1	Rettilineo principale	Il rettilineo principale è il tratto più caratteristico del circuito. Subito dopo c'è un tratto impegnativo, con due curve in sequenza.
2	Curva quattro	Questa combinazione di curve include la terza e la quarta della pista. Quella a destra è molto più impegnativa.
3	Primo sottopasso	Vicino alla quinta curva del percorso stradale, molto secca, i due tracciati di Motegi entrano in contatto: in fase di ingresso si passa direttamente sotto il Super Speedway.
4	Curva S	Questa curva a S presenta una marcata transizione sinistra-destra: invece di entrare alla massima velocità, è fondamentale trovare la via più breve per superare il settore.
5	Tornante	Dato che questa curva si trova in cima alla salita, la frenata non è molto difficile. Taglia con attenzione il punto di corda per raggiungere una buona velocità sul rettilineo seguente.
6	Rettilineo in discesa	Il rettilineo più lungo del tracciato discende verso una curva a destra, dove si presenta un'ottima occasione per il sorpasso.
7	Curva Victory	Quest'ultima curva, simile a una chicane, è composta da due curve a sinistra in sequenza, seguite da una a destra.

Willow Springs International Raceway - Big Willow

Stati Uniti

5 Sweeper

6 Curva 9

4 Monroe Ridge

Nell'area dei paddock, sul lato sinistro del rettilineo del traguardo, si trovano una tavola calda e il garage di un privato.

1 Curva Castrol

3 Omega

2 Rabbit's Ear

Lunghezza della pista: 3.951 m	Cambio di quota: 50 m	Rettilineo più lungo: 756 m	Numero di curve: 10

50
0
-50

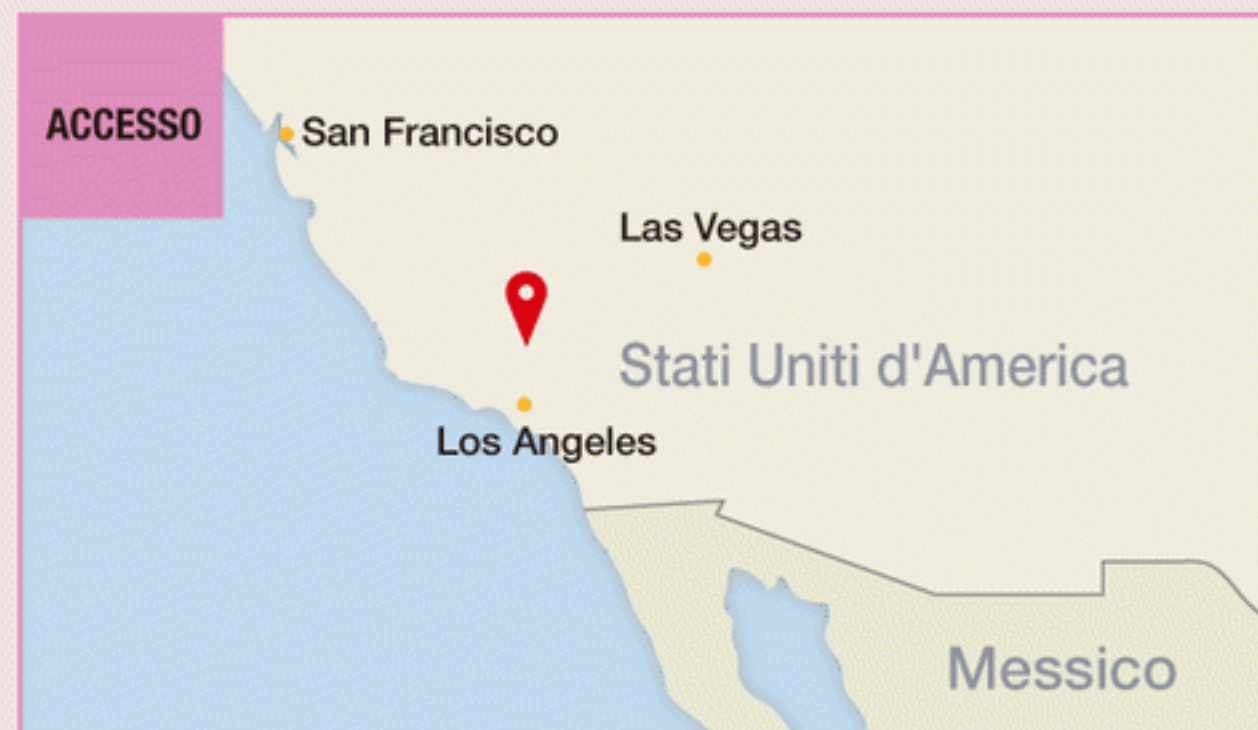
Willow Springs International Raceway Big Willow

Questo percorso ad alta velocità utilizza l'ambiente per realizzare ondulazioni pronunciate e curve rapide.

Fondato nel 1953, il Willow Springs International Raceway, con la sua configurazione nostalgica, si trova nel deserto, vicino a Los Angeles. Fra i vari tracciati che si trovano qui spicca quello principale, il veloce Big Willow stradale di 2,5 miglia (circa 4 km), caratterizzato da curve medie e veloci. A una prima occhiata la pista sembra semplice, ma mantenere la giusta velocità nei numerosi curvoni non è per niente facile. Inoltre, sono presenti variazioni di quota tali da rendere questo tracciato forse il più difficile del paese. Per vincere qui, occorre mantenere sempre il controllo dell'auto, anche alle velocità più elevate.

info Il santuario degli sport motoristici popolari americani.

Di proprietà e gestione famigliare, Willow Springs offre un ambiente sereno e idilliaco. Anche se lo staff è ridotto all'osso, tutti sono amichevoli e disponibili. All'interno del tracciato si trovano diversi garage di privati, sempre pronti a scambiare quattro chiacchiere con i visitatori: discutere con loro dello sviluppo della loro auto è sempre interessante e divertente.

Il paddock e la tavola calda con aria condizionata sono la gemma nascosta di questo circuito e la soluzione perfetta per ripararsi dal caldo. Qui si mangia all'americana: cibo saporito a buon mercato.

L'auto è il modo migliore per arrivare al circuito: dall'aeroporto internazionale di Los Angeles procedi a nord sulla I-405, quindi passa sulla I-5 e poi sulla State Route per raggiungere Rosamond in circa 90 minuti. Altri 5 km e giungerai a destinazione.

Legenda

N.	Nome	Descrizione
1	Curva Castrol	La curva a sinistra dopo il rettilineo del traguardo è uno dei punti più tecnici del tracciato.
2	Rabbit's Ear	Questa sezione ricorda la sagoma dell'orecchio di un coniglio. Il curvone è molto lungo ed è fondamentale riuscire a trovare il punto di corda giusto.
3	Omega	Questo tratto, che rappresenta la chiave della parte tecnica, è il punto più caratteristico del tracciato. Il panorama che si ammira dalla curva in discesa è spettacolare.
4	Monroe Ridge	Il tracciato è in parte nascosto dalle ondulazioni, ma se riuscirai a seguire la traiettoria giusta in questa curva potrai affrontare al meglio il settore veloce del circuito.
5	Sweeper	Una curva molto veloce, vero punto chiave di questo tracciato insidioso. Superala velocemente e potresti diventare una leggenda del posto.
6	Curva 9	A prima vista, l'ultima curva sembra semplice, ma l'uscita è molto stretta e mantenere la traiettoria corretta è piuttosto difficile.

Willow Springs International Raceway - Streets of Willow | Stati Uniti

N

3 | Bowl

2 | Curva 4

1 | Curva 2

4 | Curva 11

5 | Curva 14

Lunghezza della pista: 2.675 m	Cambio di quota: 20 m	Rettilineo più lungo: 395 m	Numero di curve: 14

20
0
-20

Willow Springs International Raceway - Streets of Willow

Un tracciato tecnico, con curve di ogni tipo.

Questo è un tracciato corto, di sole 1,6 miglia di lunghezza (circa 2,6 km), ed è situato sul lato nord del Big Willow. Spesso viene utilizzato come pista di prova e ospita numerosi eventi del tipo "giornata in pista": le gare ufficiali, invece, non sono molto numerose. Si tratta di un circuito molto tecnico e, con l'eccezione di due brevi rettilinei dove spingere al massimo, è composto più che altro da curve medie e lente in sequenza. Nonostante la lunghezza limitata, è piuttosto impegnativo a causa dei vari tipi di curve, da quelle lunghe e semplici a difficili sequenze combinate. Tutta questa varietà ne fa un luogo perfetto per migliorare le proprie capacità.

info Una tempesta di sabbia nel deserto del Mojave, come in molti film di Hollywood.

A prescindere dalla stagione, il forte vento e il sole cocente del deserto ti ricordano quanto Madre Natura possa essere brutale. Questo circuito offre un assaggio di questo ambiente estremo: qui si verificano delle tempeste di sabbia, e vederne una che si avvicina da lontano è uno spettacolo davvero terrificante. Quelle poche volte all'anno in cui si verificano delle precipitazioni, invece, le colline che circondano l'autodromo si ricoprono di vegetazione, offrendo un panorama notevolmente diverso.

Il Willow Spring Raceway è situato al centro del deserto del Mojave, dove è stato girato il film Baghdad Café. Guidando lungo il tracciato e osservando il panorama visibile dalla superstrada, ti sentirai al centro di un enorme set cinematografico.

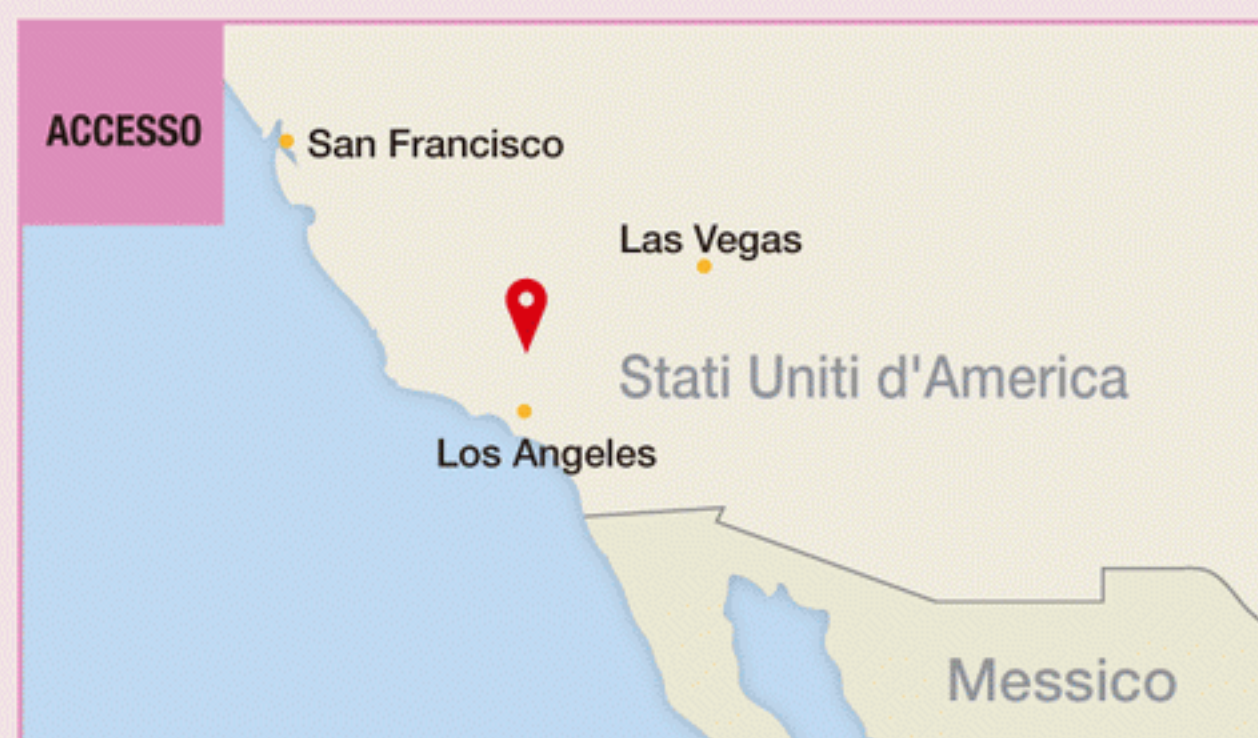
ACCESSO

San Francisco

Las Vegas

Stati Uniti d'America

Los Angeles

Messico

Per arrivare qui, le indicazioni sono praticamente le stesse già date per arrivare al Big Willow. Puoi comunque prendere una strada alternativa seguendo la I-5 North fino oltre le montagne, per poi seguire delle strade secondarie lungo la State Route 138. In questo modo ammirerai la bellezza dell'entroterra americano.

Legenda

1	Curva 2	Nelle prime curve c'è una variazione di quota di almeno 10 metri, che sottolinea i saliscendi del tracciato. Dopo questo tratto di pista c'è un'insidiosa curva a sinistra in discesa.
2	Curva 4	In questa parte del tracciato si trova uno stretto tornante in salita. La superficie sconnessa rende difficile mantenere stabile la vettura.
3	Bowl	Questo famoso curvone, soprannominato "Bowl", presenta un'inclinazione di 20 gradi.
4	Curva 11	Questa veloce curva a sinistra, che arriva dopo un lungo rettilineo, richiede una grande capacità di controllo della frenata, specie dopo le curve a S graduali che la precedono.
5	Curva 14	Questa curva è caratterizzata dalle grandi dimensioni, che invitano alla sbandata. Durante le gare vengono posizionati dei coni, con l'intento di renderla "normale".

ba

La Rivista di Gran Turismo
Beyond the Apex

Beyond the Apex

Progettazione grafica
Eichi Abe
Yuichi Miyashita

Illustrazioni tecniche
Tadao Abe

Immagini
HKS Co. Ltd.
GTA Co. Ltd.
Software Cradle Co. Ltd.
Toyota Motor Corporation
Nissan Motor Co. Ltd.
Fuji Heavy Industries Ltd.
Honda Motor Co. Ltd.
Mazda Motor Corporation
BMW AG
Daimler AG
International Sportsworld Communicators Ltd.